

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## **Výzkum 3D tisku elastomerů**

Research of 3D Printing of Elastomers

Autor práce: Bc. Barbora Prokopová

Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Ostrava 2018

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Barbora Prokopová**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Výzkum 3D tisku elastomerů**  
**Research of 3D Printing of Elastomers**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do technologie 3D tisku elastomerů.
2. Teorie 3D tisku elastomerů a současný stav.
3. Návrh a realizace experimentální činnosti.
4. Porovnání naměřených hodnot a vyhodnocení realizovaných experimentů.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

GIBSON, I; D. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010, 459 p. ISBN 1441911200.

HOLZAPFEL, G.A. *Nonlinear Solid Mechanics*, Willey and Sons, Chichester. 2000.

ZEZULA, R. *Mechanické vlastnosti vybraných elastomerů. Bakalářská práce, UTB ve Zlíně*. 2015. [online]. [cit. 2017-10-02].

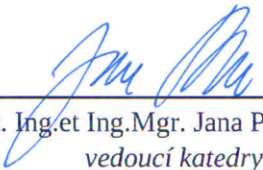
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Jan Rosický

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 16.5.2018

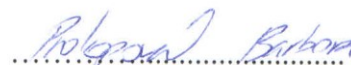


podpis studentky

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 16.5.2018



podpis studentky

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Barbora Prokopová

Adresa trvalého pobytu autora práce: Papírenská 787

Paskov 739 21

## **Poděkování**

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu své diplomové práce, panu Ing. Markovi Pagáčovi, Ph.D., za jeho čas, trpělivost, podněty a odborné vedení jak při vypracování teoretické části práce, tak při spolupráci na výzkumu. Děkuji také panu Jiřímu Rosickému, Janu Rosickému, Petru Chapčákovi a Alešovi Grygarovi z firmy Invent Medical Group s.r.o. za cenné rady, spolupráci a zkušenosti z praxe do dalších let. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Stanislavovi Polzerovi, Ph.D. za spolupráci při výzkumu a v neposlední řadě VUT v Brně, která poskytla prostory a zařízení pro výzkum diplomové práce.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2018/136 Specifický výzkum v oblasti obrábění a strojírenské metrologie s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

PROKOPOVA, B. *Výzkum 3D tisku elastomerů: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské technologie, 2018, 68 s. Vedoucí práce: Pagáč, M.

Aditivní výroba neboli také trojrozměrný tisk, je nový proces, který se používá pro výrobu trojrozměrných objektů z digitálních dat. 3D tisk představuje v nastupujícím Průmyslu 4.0 trend digitalizace a automatizace výroby. V současné době je aditivní výroba velmi rychle vyvíjena a používají se nové technologie i materiály. Tato diplomová práce je zaměřena na tisk nových inteligentních materiálů. Jsou popsány dostupné technologie tisku a dostupné materiály elastomerů. V praktické části je provedena cyklická dvouosá zkouška elastomerů a zkouška objemové stlačitelnosti. Tyto dvě zkoušky určují, zda elastomer, vytištěný 3D technologií, má stejné vlastnosti jako elastomer vyrobený konvenční metodou.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

PROKOPOVÁ, B. *Research of 3D Printing of Elastomers: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2018, 68 p. Thesis head: Pagáč, M.

Additive production, or three-dimensional printing, is a new process that is used to make 3D objects from digital data. 3D printing represents a trend in digitization and automation of production in the upcoming Industry 4.0. At present, additive production is being rapidly developed and new technologies and materials are being used. This diploma thesis is focused on the printing of new intelligent materials. The available printing technologies and available elastomeric materials are described. In the practical part a cyclic biaxially elastomeric and the volume compressibility tests are performed. These tests determine whether the elastomer, printed by 3D technology, has the same properties as the elastomer produced by the conventional method.

# Obsah

<b>Seznam použitého značení, symbolů a zkratk</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Elastomery – Technologie 3D tisku elastomerů</b> .....	<b>11</b>
2.1 Popis technologií 3D tisku elastomerů – Selektivní laserové spékání (SLS) ...	12
2.2 Popis technologií 3D tisku elastomerů – Carbon CLIP .....	13
2.3 Popis technologií 3D tisku elastomerů – MultiJet Printing.....	14
2.4 Popis technologií 3D tisku elastomerů – HP Multi Jet Fusion .....	15
2.5 Popis technologií 3D tisku elastomerů – DLP .....	16
2.6 Popis technologií 3D tisku elastomerů – SLA .....	17
2.7 Popis technologií 3D tisku elastomerů – ACEO .....	18
2.8 Popis technologií 3D tisku elastomerů – PolyJet .....	19
<b>3 Elastomery – historie, vlastnosti</b> .....	<b>20</b>
3.1 Historie elastomeru .....	20
3.2 Vlastnosti elastomeru .....	20
3.3 Složení elastomeru .....	22
<b>4 Elastomery – zkoušky</b> .....	<b>23</b>
<b>5 Elastomery pro 3D tisk</b> .....	<b>25</b>
5.1 Elastomery pro 3D tisk – SLS technologie .....	25
5.2 Elastomery pro 3D tisk – Carbon CLIP .....	26
5.3 Elastomery pro 3D tisk – MultiJet Printing .....	28
5.4 Elastomery pro 3D tisk – HP Multi Jet Fusion .....	31
5.5 Elastomery pro 3D tisk – DLP .....	31
5.6 Elastomery pro 3D tisk – SLA .....	32
5.7 Elastomery pro 3D tisk – ACEO .....	33

5.8	Elastomery pro 3D tisk – PolyJet .....	34
5.9	Porovnání mechanických vlastností materiálů .....	35
<b>6</b>	<b>Stanovení cíle práce .....</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>Výroba vzorků elastomerů na 3D tiskárně .....</b>	<b>39</b>
7.1	Tisk vzorků elastomeru pomocí SLA technologie .....	40
7.2	Tisku vzorků elastomeru pomocí technologie Carbon CLIP .....	41
<b>8</b>	<b>Zkoušky elastomerů .....</b>	<b>43</b>
8.1	Zkouška elastomerů – dvouosá zkouška .....	43
8.2	Zkouška objemové stlačitelnosti .....	47
<b>9</b>	<b>Vyhodnocení zkoušek .....</b>	<b>49</b>
9.1	Vyhodnocení dvouosé zkoušky .....	49
9.2	Vyhodnocení zkoušky objemové stlačitelnosti .....	57
9.3	Rozdíl mezi jednoosou a dvouosou tahovou zkouškou .....	57
<b>10</b>	<b>Diskuze k výsledkům práce .....</b>	<b>59</b>
<b>11</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>61</b>
	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>66</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>68</b>



## **Seznam použitého značení, symbolů a zkratek**

3D	Three-Dimensional – Trojrozměrný
CAD	Computer Aided Design – Počítačem podporované konstruování
CLIP	Continuous Liquid Interface Production – Technologie výroby kontinuálního tekutého rozhraní
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
DLP	Digital Light Processing – Digitální zpracování světla
DMD	Digital Micromirror Device – Digitální mikro-zrcadlové zařízení
MJP	MultiJet Printing – Tisk MultiJet
SLA	Stereolithography – Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering – Selektivní laserové spékání
TIF	Tag Image File – formát souboru obrázku
USD	Americký dolar
UV	Ultra Violet – ultrafialové záření

# 1 Úvod

Rychlá výroba prototypů neboli Rapid Prototyping se začalo používat na začátku 70. let 20. století. Vývoj této technologie byl rychlý a z pouhého prototypování se stala na konci 80. let nová plnohodnotná technologie nazývaná jako aditivní výroba. I když bylo v této oblasti dosaženo značného pokroku, stále je třeba ještě mnoho výzkumných prací, aby bylo možné překonat různé problémy, které u aditivní výroby přetrvávají. Jelikož se tato technologie nepochybně rychle rozvíjí a je schopna vytvářet součásti, které nejsou možné díky tradičním výrobním metodám, je používána v různých průmyslových odvětvích, jako je letecký průmysl, automobilový průmysl a nejdůležitější lékařský průmysl.

Lékařské aplikace se rychle rozšiřují a očekává se, že přinesou revoluci ve zdravotní péči. Trojrozměrný tisk byl v medicíně aplikován od počátku roku 2000, kdy byla technologie poprvé použita k výrobě zubních implantátů a vlastní protetiky. Nedávno publikované recenze popisují použití 3D tisku k vytváření protetiky a implantátů kostí, čelistí nebo okulárů, cév, tkání a orgánů.

Tato diplomová práce je zaměřena na výzkum 3D tisku elastomerů, které se mohou dále využívat v lékařském odvětví, například jako ortopedické vložky do bot na míru pacientovi apod. Elastomerní materiály pro 3D tisk jsou na trhu pouze pár let a je za potřebí je dále vyvíjet a zkoumat. V první části této práce jsou popsány současné technologie aditivní výroby, které jsou vhodné pro tisk elastomerů. Je popsán elastomer, jeho vlastnosti, zkoušky a vypsány dostupné materiály pro jednotlivé technologie. Praktická část diplomové práce se zabývá zkoumáním vlastností dvou různých materiálů vytisknuté pomocí technologie SLA a nové technologie CLIP od společnosti Carbon3D. Na tištěných vzorcích je provedena cyklická dvouosá zkouška, z které je zjištěna tvarová tuhost materiálu a zkouška objemové stlačitelnosti, z které je zjištěn objemový modul. Tyto dvě zkoušky nám určí, zda se elastomer, vtištěný 3D technologií, chová stejně jako elastomer vyrobený konvenční metodou.

## **2 Elastomery – Technologie 3D tisku elastomerů**

Aditivní výroba je nová výrobní technologie, která byla vyvinuta během posledních 10-15 let pro výrobu funkčních komponentů a výrobních dílů pro konečné použití. Všechny technologie 3D tisku jsou založeny na vytváření trojrozměrné součásti pomocí 3D modelovacího softwaru CAD, strojního zařízení a vrstveného materiálu. Jakmile je vytvořen model v CAD programu, strojní zařízení dokáže tato data přecíst a rozložit vytvořený 3D model na jednotlivé vrstvy. Postupným vytvářením po sobě jdoucích vrstev se vytváří požadovaný 3D objekt. Tloušťka vrstvy určuje výslednou kvalitu výrobku a jeho vzhled. Čím menší tloušťka vrstvy, tím bude povrch objektu přesnější a kvalitnější.

Touto technologií lze vytvořit součásti nejrůznějších materiálů podle typu technologie a zařízení. Nejpoužívanější jsou plasty a kovy, dále mohou být tištěny materiály jako beton nebo dokonce i lidská tkáň. [1]-[2]

### **Výhody aditivní výroby**

První výhodou je, že 3D tisk je možná nejvíce flexibilní výrobní proces, který kdy byl vynalezen. Touto technologií lze vyrobít součásti s extrémně složitými vnitřními geometriemi, které by bylo nemožné nebo příliš drahé vyrábět pomocí tradičních výrobních metod.

Další výhodou je, že 3D tisk šetří peníze. Vzhledem k tomu, že je celá součást vyráběna na jednom stroji, jeho výroba pomocí technologie aditivní výroby značně šetří čas. Úspory času vznikají i v důsledku odstranění potřeby montáže součástí.

Díky procesu výroby vznikají i značné úspory materiálu. S využitím tradičních metod výroby mohou výrobci očekávat, že ztratí až 90 % materiálu potřebného k výrobě součásti. Tato ztráta je zvláště obtížná v průmyslových odvětvích, jako je letectví, které pravidelně využívá titan a další podobně nákladné materiály. 3D tisk však snižuje očekávaný materiálový odpad na méně než 10 %. [3]

## 2.1 Popis technologií 3D tisku elastomerů – Selektivní laserové spékání (SLS)

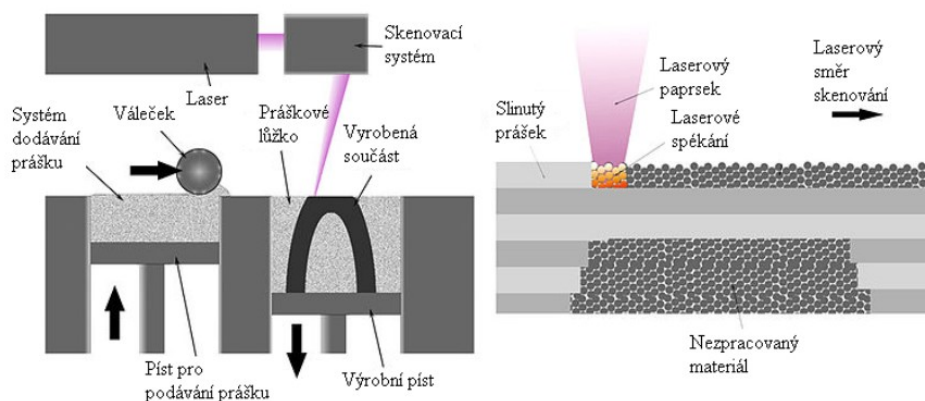
### Vývoj technologie SLS

Selective Laser Sintering (SLS) je moderní výrobní technologie, která byla vytvořena v 80. letech na University of Texas v Austinu na strojní fakultě a poté v roce 2001 komercializována firmou DTM Corporation v USA. Původně byl vyvinut studentem magisterského a později i doktorského studia. SLS se stala jednou z nejpokročilejších a nejslibnějších dnes používaných výrobních metod na světě. [8]

### Proces technologie SLS

Tato technologie využívá vysoce výkonný laser CO<sub>2</sub> jako zdroj energie pro spékání práškového materiálu. Systém se skládá z laseru, kontrolního systému a komory, která je složena ze stavební platformy, zásobníku s práškem a nivelačního válečku. Nivelační váleček nanáší vrstvu prášku na platformu, laser skenuje profil dané součásti a spéká prášek v místech průřezu. Po naskenování každého průřezu se práškové lože neboli platforma sníží o jednu vrstvu s typickou tloušťkou 20 až 150  $\mu\text{m}$  a na horní ploše se nanáší nová vrstva prášku a proces se takto opakuje až do dokončení součásti (viz obrázek 1).

Součást vyrobená touto technologií je po celou dobu obklopena neporézním práškem, což umožňuje konstrukci dříve nemožných geometrií. Také, protože komora stroje je vždy naplněna práškovým materiálem, odpadá nutnost podpurných struktur a je možná výroba více dílů najednou. Jeden z aspektů návrhu, který je třeba pozorovat, je, že u SLS je nemožné vyrobit dutý plně uzavřený prvek. Důvodem je to, že nezpracovaný prášek uvnitř součásti nemůže být odstraněn. [1]



**Obrázek 1:** Princip technologie SLS [9]

## 2.2 Popis technologií 3D tisku elastomerů – Carbon CLIP

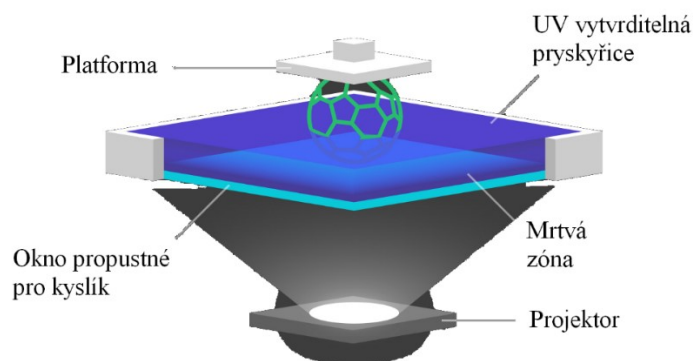
### Vývoj technologie CLIP

Společnost Carbon3D se sídlem v Silicon Valley, byla založena v roce 2013 v Chapel Hill v Severní Karolíně. Technologie Carbon CLIP byla poprvé představena na konferenci TED 2015 ve Vancouveru. Tato technologie byla vynalezena generálním ředitelem společnosti Carbon3D Josephem M. DeSimonem, profesorem chemie na Univerzitě v Severní Karolíně v Chapel Hill (UNC), spolu s kolegy Alexem Ermoshkinem, technickým ředitelem společnosti Carbon3D a Edwardem T. Samulskim, který je také profesorem chemie na UNC. [4]-[5]

### Proces technologie CLIP

Technologie založená na bázi uhlíku kombinuje vlastnosti termoplastů s vynikajícím rozlišením a povrchovou úpravou. Nabízí širokou škálu funkcí a aplikací pro různé průmyslové odvětví, jako je automobilová, zdravotní a spotřební elektronika. CLIP pracuje tak, že promítá nepřetržitou sekvenci UV obrazů, generovaných digitálním projektem světla, průsvitným oknem propustným pro kyslík pod tekutou pryskyřicí. Srdcem procesu CLIP je "mrtvá zóna" – tenké, kapalné rozhraní nevytvrzené pryskyřice mezi oknem a částí tisku. Světlo prochází mrtvou zónou a vytvrzuje pryskyřici nad ní, aby vytvořila pevnou část. Mrtvá zóna vytvořená nad oknem udržuje kontinuální rozhraní kapaliny pod součásti. Nad mrtvou zónou je vytvrzovací součást vytažena z pryskyřice (viz obrázek 2). [6]

Díky technologii Carbon CLIP můžeme tisknout součásti s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Obvyklé 3D tištěné materiály často vykazují proměnnou pevnost a mechanické vlastnosti v závislosti na směru, ve kterém byly tištěny. Díly tištěné touto technologií se chovají konzistentně ve všech směrech. [7]



**Obrázek 2:** Princip technologie Carbon CLIP [6]

## 2.3 Popis technologií 3D tisku elastomerů – MultiJet Printing

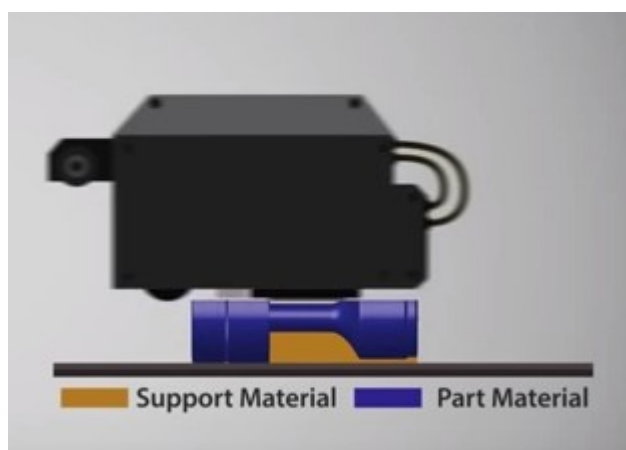
### Vývoj technologie MultiJet Printing

MultiJet Printing (MJP) je originální technologie aditivní výroby společnosti 3D Systems, ideální pro tvorbu pevných, funkčních prototypů ve vysokém rozlišení. Společnost 3D Systems uvedla 3D tiskárny MultiJet Printing na trh v roce 1996. [32]

### Proces technologie MultiJet Printing

Tisk MJP nebo MultiJet je proces inkoustového tisku, který nabízí rychlý tisk hladkých součástí se složitými geometriemi. Tento proces výroby začíná jako každá jiná 3D technologie tisku, a to dělením 3D CAD souboru do stovek přesných vrstev. 3D tiskárna poté vytiskne velmi jemné vrstvy z tekutého plastu nebo vosku, které jsou dále vytvrzovány UV zářením. Voskovitý nosný materiál je také tryskán pro vyplnění dutin a jiných složitějších tvarů.

Tato tiskárna s vysokým rozlišením je hospodárná na provoz. MJP tiskárny nabízejí nejvyšší rozlišení ve směru Z s tloušťkou vrstvy až 16 mikronů. Části mají hladký tištěný povrch. Nedávné pokroky v materiálech zlepšily životnost plastových materiálů a jsou nyní vhodné pro některé konečné aplikace, jako například sluchátka, kryty apod. [33]



**Obrázek 3:** Proces technologie MJP [33]

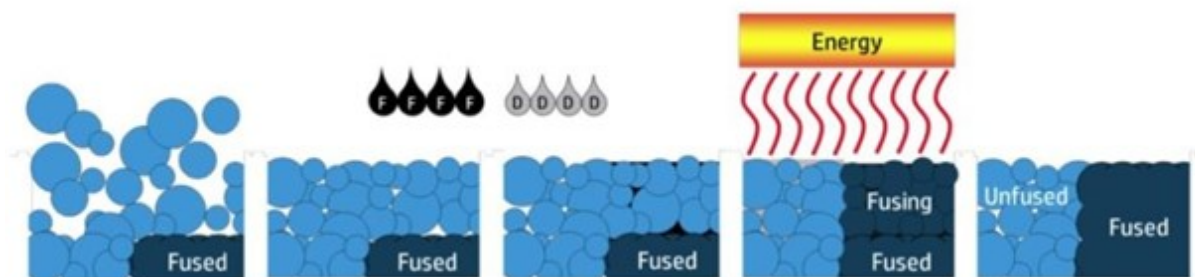
## 2.4 Popis technologií 3D tisku elastomerů – HP Multi Jet Fusion

### Vývoj technologie HP Multi Jet Fusion

Společnost HP v říjnu 2014 oznámila vývoj technologie HP Multi Jet Fusion, se kterou se zaměřili na prototypový trh a krátkodobou výrobu finálních dílů. Vynalezli technologii, která je až desetkrát rychlejší a za polovinu nákladů než současné technologie, jako například SLA nebo SLS. Tiskárna HP Jet Fusion 3D 4200 se dostala na trh koncem roku 2016 a tiskárna HP Jet Fusion 3D 3200 na podzim roku 2017. [10]

### Proces technologie HP Multi Jet Fusion

HP Multi Jet Fusion je plnobarevný proces, který umožňuje vytvářet 3D objekty až desetkrát rychleji než technologie SLS. Technologie probíhá opakovaným nanášením tenké vrstvy práškového materiálu, na kterou se přesně a rovnoměrně aplikuje fúzovací a detailní látka. Fúzovací látka se aplikuje na tu část vrstvy, kterou chceme sloučit. Detailní látka slouží k vytvoření hladkého povrchu součásti a proces fúze inhibuje tam, kde vrstvu sloučit nechceme. Na každý čtvereční centimetr pracovní plochy připadá 30 mil. kapek roztoků za vteřinu. Díky tomu se zajistí dosažení vysokého detailu a prostorové přesnosti. Poté se na tiskovou plochu dodává energie a díky aplikaci právě zmiňovaných roztoků zajistí, že dojde k selektivní fúzi, při které vznikne finální výrobek. Celý proces technologie je zobrazen na obrázku 4. [11]-[12]



**Obrázek 4:** Proces technologie HP Multi Jet Fusion [12]

## 2.5 Popis technologií 3D tisku elastomerů – DLP

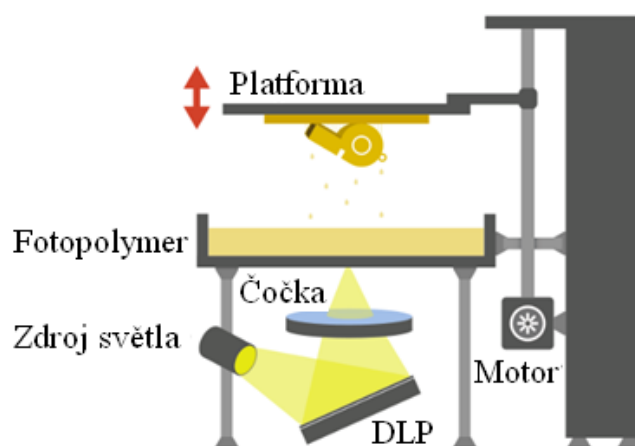
### Vývoj technologie DLP

Společnost EnvisionTEC od roku 1999 vyvinula a uvedla na trh hned několik nových technologií aditivní výroby. V roce 2002 společnost začala vyrábět tiskárny, které pracovaly pomocí projektorů DLP. Takovéto projektory vynalezl v roce 1987 Dr. Larry Hornbeck z Texas Instruments. [13]

### Proces technologie DLP

DLP (Digital Light Processing) je 3D tiskový proces, který pracuje s fotopolymerem. DLP používá běžný světelný zdroj, jako je oblouková lampa se zobrazovacím panelem z tekutých krystalů nebo digitální mikro-zrcadlové zařízení (DMD), který osvětluje celý povrch nádrže fotopolymerové pryskyřice najednou. Jakmile je 3D model odeslán do tiskárny, kapalný polymer je vystaven světlu z DLP projektoru. Projektor osvětluje obraz dané vrstvy na povrch nádrže s kapalinou. Daná vrstva kapalného polymeru se vytvrdí a konstrukční deska klesne o tloušťku další vrstvy. Proces se opakuje, dokud není 3D model dokončen a kádě s kapalinou vypuštěna. Proces je znázorněn viz obrázek 5.

Tento proces je velmi podobný stereo litografii (SLA). Díky tomu, že místo laseru používá světlo, které osvětluje celý povrch nádrže najednou, je tato technologie rychlejší. Další výhodou této technologie je to, že je zapotřebí pouze mělká kádě pryskyřice, což zpravidla vede k menšímu množství odpadu a nižším provozním nákladům. [14]



**Obrázek 5:** Proces technologie DLP [14]



## 2.6 Popis technologií 3D tisku elastomerů – SLA

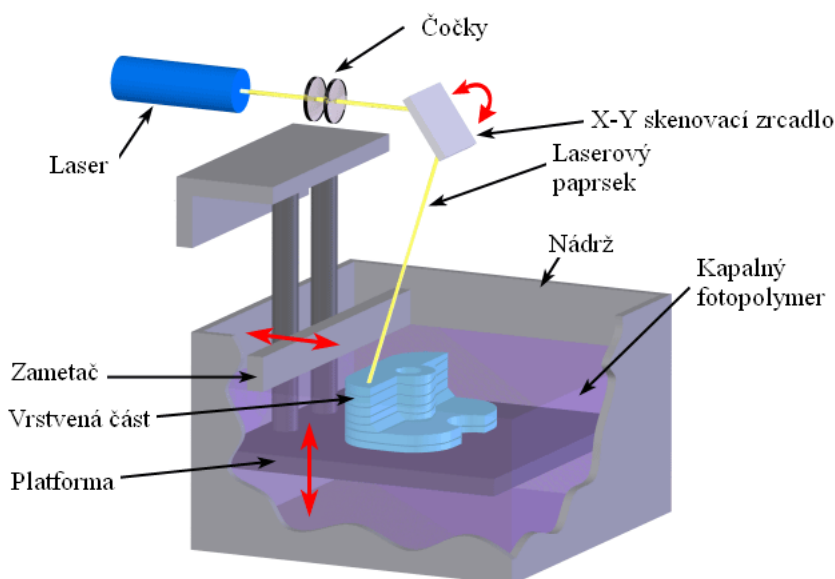
### Vývoj technologie SLA

Proces SLA se poprvé objevil na počátku 80. let 20. století, kdy japonský badatel Dr. Hideo Kodama vynalezl moderní vrstvený postup využívající ultrafialové světlo k vytvrzení fotosenzitivních polymerů. Samotná stereolitografie byla vytvořena Charlesem W. Hullem, který vynalezl moderní tvůrčí faktor stroje, pak v roce 1984 patentoval technologii a spoluzaložil společnost 3D Systems, aby ji komercializovala. [15]-[36]

### Proces technologie SLA

Stereolitografie (SLA) je velmi podobná technologii DLP. Je založena na vytvrzování epoxidové nebo akrylátové pryskyřice, ale na rozdíl od technologie DLP se tato pryskyřice vytvrzuje pomocí laseru. SLA zařízení se skládají ze čtyř hlavních částí. První je nádrž, kterou lze naplnit fotopolymerem, další je platforma, která je spuštěna do nádrže, ultrafialový (UV) laser a počítač řídící plošinu a laser.

V prvním kroku je platforma ponořena do nádrže tak, aby nad touto plošinou vznikla vrstva s fotopolymerem přibližně okolo 0,05-0,15 mm. UV laser sleduje průřez dané vrstvy, kde se tekutina okamžitě vytvrdí a vzniká tak první vrstva 3D tištěného objektu. Jakmile je první vrstva vytvrzena, platforma je spuštěna o tloušťku další vrstvy a celý proces se opakuje, dokud není celý objekt vytvořen a zcela ponořen do nádrže. Proces této technologie je zobrazen na obrázku 6. [15]



**Obrázek 6:** Proces technologie SLA [16]

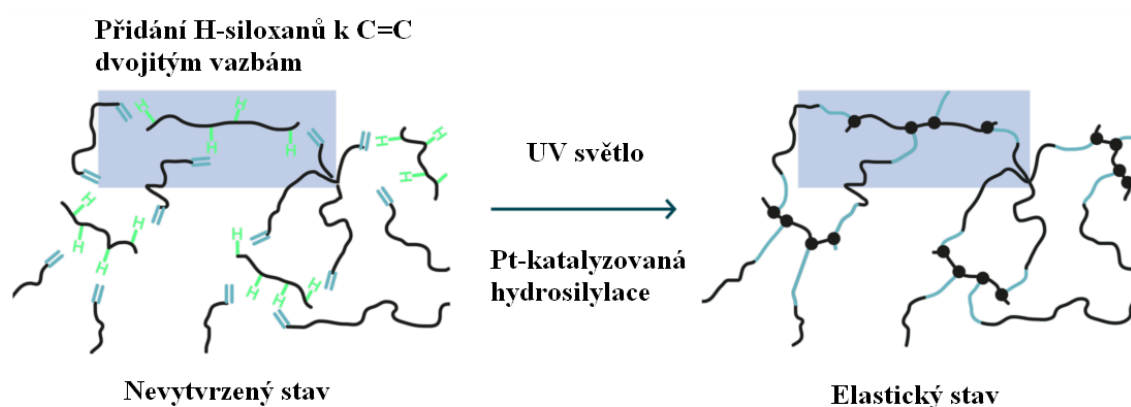
## 2.7 Popis technologií 3D tisku elastomerů – ACEO

### Vývoj technologie ACEO

Společnost ACEO poprvé představila svou technologii v roce 2016. Při tištění silikonu je nejdůležitější, aby si materiál udržel své vynikající vlastnosti, jako je odolnost vůči teplotě, záření anebo biokompatibilitu. Společnost ACEO vyvinula jak hardware, tak software pro svůj jedinečný materiál a technologii uvedla na trh. V červenci 2017 otevřela společnost přístupnou tiskárnu v Burghausenu a nabídla zákazníkům na míru programy 3D tisku. [23]

### Proces technologie ACEO

ACEO je technologie vytvořena pro tisk silikonových materiálů. Tisková hlava ukládá jednoduché silikonové kapičky na stavěcí plošinu a tvoří tak homogenní povrch první vrstvy. Po vytištění vrstvy je nutné tuto vrstvu vytvrdit pomocí UV světla. Silikonový kaučuk musí být vulkanizován, aby se přeměnil na elastomerní materiál (viz obrázek 7). Chemický proces technologií ACEO je založen na vytvrzování s přidavkem katalyzované platiny. Během vytvrzovacího procesu reagují skupiny Si-H zesilovače s vinylovými skupinami polymeru za vzniku trojrozměrné sítě. Výsledkem je 100 % silikon. Tímto způsobem je požadovaný objekt vybudován vrstvou po vrstvě. Pro realizaci složitých konstrukcí, převisů a dutin se při stejném procesu tiskne podpurný materiál. Hned po ukončení tisku se z tiskárny vyjme silikonová část a nosný materiál se snadno vypláchne vodou. Následně je část temperován, aby se dosáhlo konečných mechanických vlastností. Výhodou je, že nejsou uvolňovány žádné vedlejší produkty, takže se silikonový kaučuk vytvrzuje bez smrštění. [22]



**Obrázek 7:** Proces technologie ACEO [22]

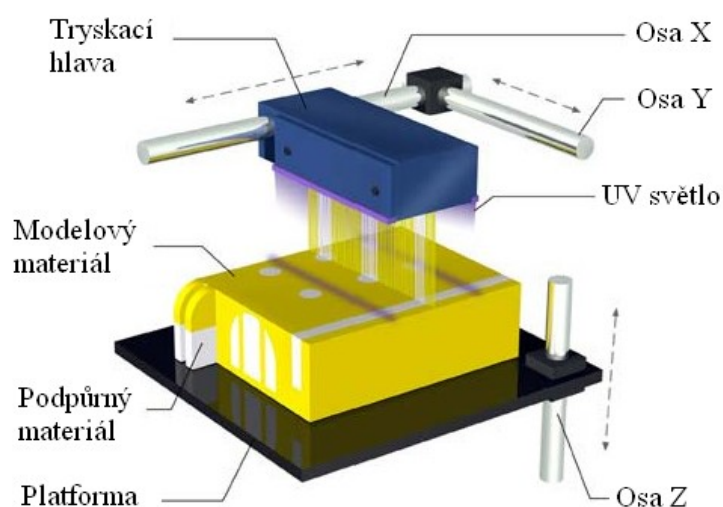
## 2.8 Popis technologií 3D tisku elastomerů – PolyJet

### Vývoj technologie PolyJet

Technologie PolyJet byla patentována a představena společností Objet v roce 2000. Soukromá společnost Objet se dne 16. dubna 2012 dohodla se společností Stratasys na sloučení těchto dvou firem. Sloučení bylo dokončeno 3. prosince 2012. [17]

### Proces technologie PolyJet

PolyJet pracuje na principu nanášení velmi tenké vrstvy tekutých fotopolymerových materiálů na platformu pomocí tryskových hlavic. Každá vrstva fotopolymeru je okamžitě po nástřiku na platformu vytvrzena UV světlem, jak můžeme vidět na obrázku 8. Jelikož je součást stavěna na platformu od spodní vrstvy a není vytahována z nádrže jako tomu je u technologie CLIP nebo DLP, musí být použit i podpůrný materiál k podepření komplikovaných geometrií. Tento podpůrný materiál je gelový a po dokončení tisku součásti je odstraněn proudem vody nebo v lázni s roztokem. [18]-[19]



**Obrázek 8:** Proces technologie PolyJet [17]

## **3 Elastomery – historie, vlastnosti**

### **3.1 Historie elastomeru**

První nápad, jak využívat tzv. gumový strom *Hevea Brasiliensis*, získali domorodci z Jižní Ameriky. Vyráběli první vodotěsnou obuv z kaučuku neboli elastomeru. V 18. století se kaučuk objevil v Evropě, kde byl použit k výrobě podvazků a popruhů, byly impregnovány různé druhy materiálů, aby byly voděodolné. Pryžové výrobky nebyly v té době tak kvalitní, protože při každé změně teplot, produkt změnil své vlastnosti. Teprve v roce 1839 Charles Goodyear objevil téměř náhodě vulkanizaci kaučuku, což vedlo ke zlepšení kvality elastického materiálu, který si zachoval vlastnosti přes široký rozsah teplot. [20]

### **3.2 Vlastnosti elastomeru**

Elastomer jsou založeny na polymerech, které mají velkou poddajnost, tedy nízkou tuhost a extrémní tažnost ve stovkách %. Jsou tvořeny dlouhými řetězci atomů (především uhlíkem, vodíkem a kyslíkem), které mají zesíťovací vazby se sousedními řetězci. Právě tyto vazby vytlačují elastomer zpět do původního tvaru po odstranění deformační síly a elastomer tak nezmění svůj tvar. Tyto řetězce mohou obvykle obsahovat 300 000 nebo více monomerních jednotek. Mohou být složeny z jednoho, dvou anebo více typů monomerů.

Elastomery jsou pravděpodobně nejvšestrannější konstrukční materiály. Chovají se velmi odlišně od plastů a kovů, zvláště ve způsobu deformace a zotavení pod zatížením. Jsou to složité materiály, které vykazují jedinečné kombinace užitečných vlastností, z nichž nejdůležitější je hyper-elastická a vysoká lomová houževnatost. Pokud elastomery namáháme nad mez kluzu, deformují se roztažením, stlačením nebo zkroucením a po odstranění síly, se vracejí téměř do původního tvaru. [21]-[23]

#### **3.2.1 Elasticita**

Elasticita je schopnost materiálu vrátit se do původního tvaru a velikosti po jeho roztažení, stlačení, zkroucení nebo ohnutí. Elastická deformace (změna tvaru nebo velikosti) trvá jen tak dlouho, dokud působí deformační síla, a zmizí po odstranění síly. Elasticita elastomerů vyplývá ze schopnosti jejich dlouhých polymerních řetězců překonfigurovat se za aplikovaného napětí. Křížové vazby mezi řetězci zajišťují, že elastomer se vrátí do původní konfigurace, když se odstraní napětí. V důsledku této extrémní pružnosti se elastomery mohou v závislosti na konkrétním materiálu reverzibilně rozšířit o přibližně 200 až 1000 %. Bez křížových vazeb

nebo krátkých, neklidně rekonfigurovaných řetězců by zatížení způsobilo trvalou deformaci. [21]-[23]

### **3.2.2 Další vlastnosti**

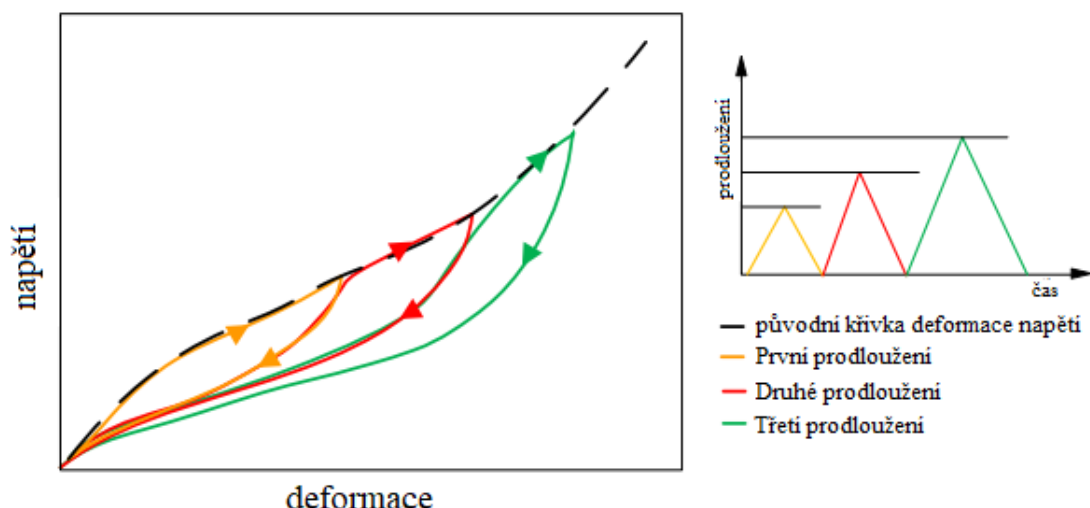
Většina elastomerů má řadu dalších užitečných vlastností jako jsou:

- Nízká propustnost pro vzduch, plyny, vodu a páru.
- Dobrá elektrická a tepelná izolace.
- Schopnost přilnout k různým vláknům, kovům a tuhým plastům.

Rovněž vhodným výběrem složek mohou být výrobky se zlepšenými nebo specifickými vlastnostmi navrženy tak, aby splňovaly širokou škálu provozních podmínek. Tato kombinace vlastností je důvodem, proč mají elastomery velké množství technických potřeb v oborech zabývajících se těsněním, tlumením nárazů, tlumením vibrací a elektrickou a tepelnou izolací. Většina typů elastomerů jsou termosety, které zvýší svou tuhost po vulkanizaci. Vzniká tak stupeň zesílení mezi polymerními řetězci. Zesíťování je nevratné. Termoplastické elastomery mají naopak slabší zesílení a mohou být vytvarovány, vytlačovány a znovu použity jako plastové materiály, přičemž mají stále typické elastické vlastnosti elastomerů. [21]-[23]

### **3.2.3 Mullinsův efekt**

Elastomery vykazují charakteristické chování materiálu při cyklickém zatížení nazývaném Mullinsův efekt. Mullinsův efekt je zvláštním aspektem mechanické odezvy v elastomerech, při nichž křivka namáhání napětí a deformace závisí na maximálním zatížení, které již na elastomer působilo. Jinými slovy, jestliže natahujeme elastomer podruhé podobným namáháním jako poprvé, je nutná menší síla. Typické měknutí pryže vzniklé při cyklickém zatížení je znázorněno na obrázku 9. [39]



**Obrázek 9:** Graf cyklického zatížení elastomeru (Mullinsův efekt) [39]

Měknutí pryže je zjištěno pouze na určitou úroveň deformace. Pokud napětí tuto úroveň překročí, napětí stoupá na původní křivku deformace napětí. Obecně platí, že většina změkčení napětí se projevuje v prvních cyklech (řádově do 10 cyklů, ale počet cyklů závisí na typu pryže). Zajímavou charakteristikou efektu Mullins je, že pro tento jev nelze zjistit žádnou obecnou hranici. Nicméně vliv je ovlivněn krystalizací a anizotropií. [39]

### 3.3 Složení elastomeru

Důležitými faktory, které ovlivňují kvalitu a vlastnosti výsledného elastomeru, jsou použité složky, kvalita surovin, styl míchání prášku a kontrola jakosti při míchání. Vlastnosti konečného produktu mohou být také ovlivněny zpracováním složeného materiálu do tvaru konečného výrobku. [21]

- Polymery – Polymer nebo směs polymerů je základním prvkem při určování vlastností sloučeniny.
- Plniva – Plniva se přidávají především k zajištění vyztužení a ke snížení nákladů. Nejpopulárnější plnidly jsou saze, které jsou kategorizovány především pomocí velikosti částic nebo super jemné jíly, které jsou dražší ale mají lepší mechanické vlastnosti.
- Urychlovače
- Aktivátory – Ve většině vulkanizovaných kaučuků se přidává oxid zinečnatý a kyselina stearová.
- Pigmenty a další

## 4 Elastomery – zkoušky

- **Tvrlost – BS ISO 48**

Tvrlost uvedená u elastomerů se obvykle vztahuje k výsledku získanému ze „standardního“ zkušebního kusu, který je popsán viz norma BS ISO 48. Výsledky získané z nestandardního zkušebního kusu, např. těsnění, jsou obvykle označovány jako „zjevná tvrdost“. Výsledky získané měřením tvrdosti vsázky materiálu za použití standardního zkušebního kusu se mohou lišit od výsledků získaných z testovaného produktu vyrobeného ze stejné šarže. [21]

- **Pevnost v tahu – BS ISO 37**

Jedná se o měřítko napětí, které je nutné pro roztržení standardního zkušebního kusu. Teplota má výrazný vliv na pevnostní vlastnosti elastomerů, ať už se jedná o tahy, roztržení nebo tlaky. Zkoušky pokojové teploty zřídla poskytují přesně indikaci jejich pevnosti při zvýšených teplotách. Pro dosažení smysluplnějšího výsledku lze zkoušky tahem provádět za zvýšených teplot. [21]

- **Prodloužení při přetržení – BS ISO 37**

Prodloužení (procentuální deformace) měřené v bodě prasknutí. [21]

- **Modul – BS ISO 37**

V terminologii elastomeru je modul definovaný jako napětí při určitém prodloužení (zatímco u kovů je to poměr napětí k deformaci, protože platí Hookeův zákon). Modul má tendenci se zvyšovat s tvrdostí. [21]

- **Kompresní sada – BS ISO 815-1 a-2**

Při každém utěsnění při konstantní teplotě bude mechanicky namáhaný elastomer vykazovat časově závislou relaxaci. Pokud je elastomer následně odtížen silou, obnoví se elastomer směrem k jeho původnímu tvaru v rozsahu definovaném chemickou a fyzikální degradací. Takové jevy relaxace a zotavení jsou určeny především viskoelastickou povahou elastomerů a chemickými reakcemi, ke kterým dochází mezi materiálem a prostředím. Kompresní sada je široce používána pro vyhodnocení zotavení. Standardní metody vyžadují, aby byl stlačený vzorek vystaven po určité době při fixní teplotě a pak byl ponechán zotavit se při pokojové teplotě (obvykle 30 minut). Sada komprese je vyjádřena jako procentní podíl

původní deformace, která nebyla obnovena po tomto zotavení: 0 % udává úplné zotavení, 100 % znamená, že nedošlo k obnově tvaru. [21]

- **Odolnost proti tekutinám – BS ISO 1817**

Ponoření vzorků do různých tekutin při různých teplotách, po nichž následuje testování změny objemu, změna pevnosti v tahu, změna tvrdosti atd. Poskytne spolehlivý údaj o tom, jak bude materiál pracovat za podobných provozních podmínek. [21]

- **Testování při nízkých teplotách**
- **Pevnost v roztržení**
- **Odolnost proti otěru**
- **Zkoušení ozónem, zvětrávání a UV záření**
- **Radiační testování**
- **Průběhové zkoušky**
- **Elektrické testování**
- **Materiálová analýza**
- **Chemická kompatibilita**
- **Zkouška průhybu zatížení**



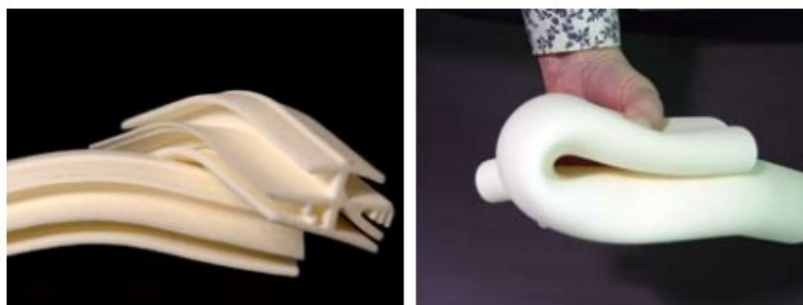
## 5 Elastomery pro 3D tisk

### 5.1 Elastomery pro 3D tisk – SLS technologie

#### 5.1.1 DuraForm Flex Plastic

Termoplastický elastomerový materiál s pružností a funkcí jako pryž. Je to trvanlivý materiál s dobrou odolností proti roztržení vyráběný firmou 3DSYSTEMS. Používá se pro výrobu těsnění, hadic nebo atletické obuvi. [24]

Součásti vyrobené z tohoto materiálu jsou pro konečné použití vyžadující dlouhodobou stabilitu a vyžaduje se minimální konečná úprava. [24]



Obrázek 10: Materiál DuraForm Flex [24]

Tabulka 1: Vlastnosti materiálu DuraForm Flex [24]

OBECNÉ VLASTNOSTI	
Hustota	0,44 g/cm <sup>3</sup>
Bod tání	192 °C
MECHANICKÉ VLASTNOSTI	
Pevnost v tahu	1,8 MPa
Prodloužení při přetržení	110 %
Tahový modul	7,4 MPa
Modul pružnosti v ohybu	4,9 MPa
Tvrdost, Shore D	45–75
Počáteční odolnost proti odtrhávání	15,1 J/m
Odolnost proti otěru	83,5 J/m (na 1000 cyklů)

#### 5.1.2 DuraForm TPU Elastomer

Termoplastický elastomerový materiál vyráběný firmou 3DSYSTEMS. Je to materiál s dobrou odolností proti otěru, ideální pro spotřební zboží (např. podrážky na boty), má dobrou flexibilitu s vynikající pevností, je těžké materiál přetrhnout a má vynikající paměť svého tvaru a délky. [25]



**Obrázek 11:** Materiál DuraForm TPU Elastomer [25]

**Tabulka 2:** Vlastnosti materiálu DuraForm TPU Elastomer [25]

OBEČNÉ VLASTNOSTI	
Hustota	0,78 g/cm <sup>3</sup>
MECHANICKÉ VLASTNOSTI	
Pevnost v tahu	2,1 MPa
Prodloužení při přetržení	200 %
Tahový modul	5,3 MPa
Modul pružnosti v ohybu	6,0 MPa
Tvrdost, Shore D	59
Počáteční odolnost proti odtrhávání	15,4 J/m
Odolnost proti otěru	97,9 mg/1000 cyklů

## 5.2 Elastomery pro 3D tisk – Carbon CLIP

### 5.2.1 Silikon

Silikon nabízí kombinaci biokompatibility, nízké tvrdosti a odolnosti proti roztržení. Tento materiál otevírá možnosti tisku přizpůsobených aplikací pro pohodlné výrobky s kontaktem s pokožkou, jako jsou sluchátka, náramky a jiné. [26]



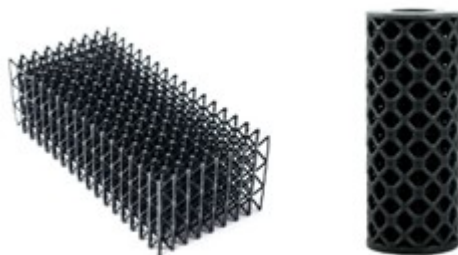
**Obrázek 12:** Výrobky z materiálu Silikon [26]

**Tabulka 3:** Vlastnosti materiálu Silikon [26]

OBEČNÉ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI	
Tvrdost	35, Shore A
Síla roztržení	9,6 kN/m
TAŽNÉ VLASTNOSTI	
Pevnost v tahu	3,4 MPa
Prodloužení při přetržení	330 %
Napětí při 50 % prodloužení	0,42 MPa
Napětí při 100 % prodloužení	0,69 MPa
Napětí při 200 % prodloužení	1,45 MPa

### 5.2.2 EPU: Elastomerní polyuretan

EPU je vysoce elastický a pružný elastomerní materiál. Jeho kombinace odolnosti proti přetržení a prodloužení je ideální pro tlumení, izolaci vibrací a těsnění. EPU se chová podobně jako polyuretanové elastomery tvarované vstřikováním, vykazující elastické chování v širokém teplotním rozmezí. [27]

**Obrázek 13:** Materiál EPU: Elastomerní polyuretan [27]**Tabulka 4:** Vlastnosti materiálu EPU: Elastomerní polyuretan [27]

TAŽNÉ VLASTNOSTI	
Pevnost v tahu	10,2 ± 1,6 MPa
Prodloužení při přetržení	310 ± 25 %
Napětí při 50 % prodloužení	1,9 MPa
Napětí při 100 % prodloužení	3,0 MPa
Napětí při 200 % prodloužení	5,5 MPa
MECHANICKÉ VLASTNOSTI	
Pevnost při roztržení	23 ± 3 kN/m
Tvrdost	68, Shore A
Hustota	1,00–1,025 g/cm <sup>3</sup>

## 5.3 Elastomery pro 3D tisk – MultiJet Printing

### 5.3.1 VisiJet CE-BK

Vysoce výkonný neprůhledný černý elastomerní materiál s výborným prodloužením a tvrdostí Shore A. Je vhodný pro prototypování široké škály mechanických aplikací, které vyžadují funkčnost jako pryž. Tento materiál je ideální pro těsnění a další aplikace vyžadující extrémní vlastnosti flexibilního materiálu a může se pochlubit výbornými vlastnostmi v tahu. [28]



**Obrázek 14:** Materiál VisiJet CE-BK [28]

**Tabulka 5:** Vlastnosti materiálu VisiJet CE-BK [28]

VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Barva	Neprůhledná černá
Hustota	1,12 g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	0,2–0,4 MPa
Počáteční modul pružnosti	0,27–0,43 MPa
Prodloužení při přetržení	160–230 %
Tvrdost	27–33, Shore A
Odolnost proti přetržení	3,1–3,7 kN/m

### 5.3.2 VisiJet CE-NT

Vysoce výkonný, průsvitný elastomerní materiál s výborným prodloužením a tvrdostí Shore A pro funkční prototyp ve fázi vývoje produktu. Tento elastomerní materiál se může pochlubit úžasnými vlastnostmi v tahu a díky jeho přirozené barvě je vhodnou variantou pro aplikace v lékařském odvětví a anatomii. [29]



**Obrázek 15:** Materiál VisiJet CE-NT [29]

**Tabulka 6:** Vlastnosti materiálu VisiJet CE-NT [29]

VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Barva	Přírozně průsvitná
Hustota	1,12 g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	0,2–0,4 MPa
Počáteční modul pružnosti	0,27–0,43 MPa
Prodloužení při přetržení	160–230 %
Tvrdost	27–33, Shore A
Odolnost proti přetržení	3,1–3,7 kN/m

### 5.3.3 VisiJet M2 ENT

Tento průsvitný přírodní barevný elastomerní materiál nabízí nejlepší kombinaci ohybnosti a pevnosti s výborným, prodloužením a plnou elastickou pamětí. VisiJet M2 ENT je flexibilní průsvitný materiál, který je vynikající pro tisk měkkých, pryžových dílů, jako jsou těsnění, potrubí a další. [30]



**Obrázek 16:** Materiál VisiJet M2 ENT [30]

**Tabulka 7:** Vlastnosti materiálu VisiJet M2 ENT [30]

VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Barva	Přirozeně průsvitná
Hustota	1,12 g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	0,2–0,4 MPa
Počáteční modul pružnosti	0,27–0,43 MPa
Prodloužení při přetržení	160–230 %
Tvrdost	28–32, Shore A

#### 5.3.4 VisiJet M2 EBK

VisiJet M2 EBK je flexibilní neprůhledný černý materiál, který je vynikající pro tisk měkkých, pryžových dílů, jako jsou těsnění, potrubí a další. Tento elastomerní materiál nabízí nejlepší kombinaci ohybnosti a pevnosti, s úžasným prodloužením a plnou elastickou pamětí. [31]



**Obrázek 17:** Materiál VisiJet M2 EBK [31]

**Tabulka 8:** Vlastnosti materiálu VisiJet M2 EBK [31]

VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Barva	Neprůhledná černá
Hustota	1,12 g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	0,2–0,4 MPa
Počáteční modul pružnosti	0,27–0,43 MPa
Prodloužení při přetržení	160–230 %
Tvrdost	28–32, Shore A

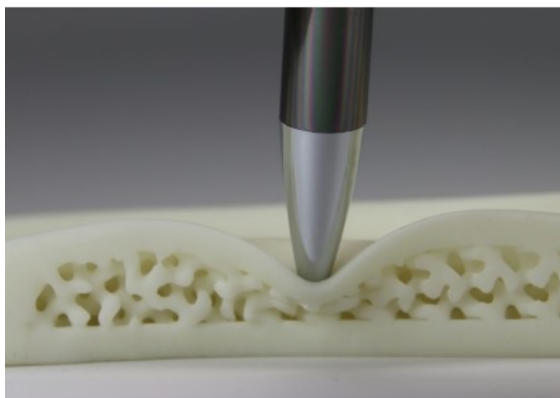
## 5.4 Elastomery pro 3D tisk – HP Multi Jet Fusion

Tiskárny s touto technologií se dostaly na trh teprve nedávno a materiály se postupně vyvíjejí a testují. Firma Invent Medical má, jako jedna ze dvou firem v České Republice, právě zmiňovanou tiskárnu s technologií HP Multi Jet Fusion. Elastomer na tuto tiskárnu je právě ve fázi testování a na trh bude uvedena přibližně v polovině roku 2018. Bude se jednat o materiál TPU (termoplastický polyuretan).

## 5.5 Elastomery pro 3D tisk – DLP

### 5.5.1 E-Shore A

Tento pokročilý technický materiál je polyuretanový materiál, který vyrábí finální výrobky s hodnotami Shore A 40 nebo 80. E-Shore A je materiál vyvinutý pro konečné použití, jako je obuv, sportovní zboží a jiná použití vyžadující trvanlivost a flexibilitu. Další výhodou tohoto materiálu je vodotěsnost. [32]



**Obrázek 18:** Materiál E-Shore A [32]

**Tabulka 9:** Vlastnosti materiálu E-Shore A [32]

VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Hustota	1,6 g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	4,46 MPa
Prodloužení při přetržení	200 %
Tvrdost	40–50 A nebo 80 A, Shore A
Pevnost při přetržení	21,7 kN/m

### 5.5.2 E-Shell 500 Series

Materiál E-Shell 500 byl navržen speciálně pro aplikace v průmyslu sluchadel a je určena pro měkkou trvanlivost. Tento materiál je kapalný foto reaktivní akrylát pro výrobu funkčních částí. Jsou odolné proti vodě a potu a jsou k dispozici v několika barevných variantách, které připomínají pokožku člověka. [33]



**Obrázek 19:** Materiál E-Shell 500 Series [33]

**Tabulka 10:** Vlastnosti materiálu E-Shell 500 Series [33]

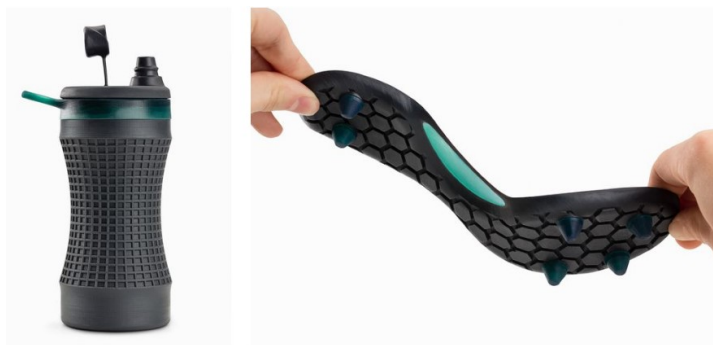
VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Viskozita	3000 cps
Vytvrzování	10 s
Prodloužení při přetržení	60 %
Tvrдость	87, Shore A
Pevnost při přetržení	810 MPa

## 5.6 Elastomery pro 3D tisk – SLA

### 5.6.1 Flexible Resin 1 L

Flexibilní materiál Flexible Resin 1 L simuluje kaučuk o tvrdosti Shore A 80 a vytváří tak součásti, které se mohou ohýbat a stlačovat. Tento materiál vyžaduje UV post-processing. Používá se například k výrobě rukojetí, tlumení nebo obalů. [34]





**Obrázek 20:** Materiál Flexible Resin 1 L [34]

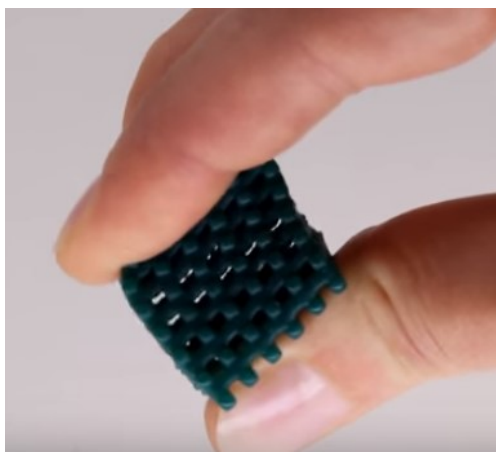
**Tabulka 11:** Vlastnosti materiálu Flexible Resin 1 L [34]

VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Pevnost v tahu	7,7–8,5 MPa
Prodloužení při přetržení	75–80 %
Tvrдость	70–75, Shore A
Pevnost při přetržení	13,3–14,1 kN/m

## 5.7 Elastomery pro 3D tisk – ACEO

### 5.7.1 ACEO Silicone

Jelikož je technologie ACEO velmi mladá, na trhu se zatím objevuje pouze jeden materiál, a to ACEO Silicone, který si v průběhu 3D procesu tisku udržuje vynikající vlastnosti a umožňuje tak výrobu náročných výrobků. Silikony mají teplotní stabilitu a biokompatibilitu. Tyto materiály jsou k dispozici ve různých barvách a odstínech, včetně černých. Díky tomu jsou ideální pro nejrozmanitější aplikace, od automobilového průmyslu až po zdravotní péči až po produkty individuálního životního stylu. K dispozici jsou materiály tvrdosti Shore A 30, A 40 a A 60. [22]



**Obrázek 21:** Materiál ACEO Silicone [22]

**Tabulka 12:** Vlastnosti materiálu ACEO Silicone, Shore A 60 [22]

VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Tvrdost	60, Shore A
Hustota	1,10 g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	6,00 MPa
Prodloužení při přetržení	450 %
Pevnost při přetržení	15 N/mm
Odolnost vůči odrazu	60 %

**Tabulka 13:** Vlastnosti materiálu ACEO Silicone, Shore 30 [22]

VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Tvrdost	30, Shore A
Hustota	1,12 g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	7,00 MPa
Prodloužení při přetržení	200 %
Odolnost vůči odrazu	68 %

## 5.8 Elastomery pro 3D tisk – PolyJet

### 5.8.1 Objet Agilus, Agilus Black

Řada materiálů Agilus je sada pružných gumových pryskyřic pro PolyJet. Agilus je průsvitný, zatímco Agilus Black má barvu černou. Oba materiály Agilus poskytují vynikající odolnost proti roztržení a prodloužení při přetržení, což je činí vhodnými pro prototypy pryžových součástí jako jsou těsnění, protiskluzové povrchy nebo přetavování. [35]



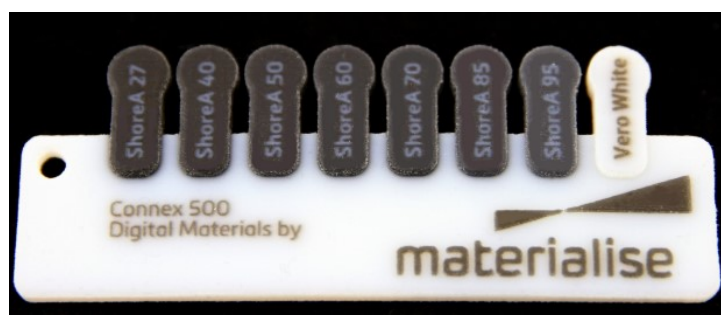
**Obrázek 22:** Materiál Agilus Black [35]

Tabulka 14: Vlastnosti materiálu Agilus Black [35]

VLASTNOSTI MATERIÁLU	
Barva	Černá
Tvrдост	30–35, Shore A
Pevnost v tahu	2,4–3,1 MPa
Prodloužení při přetržení	220–270 %
Odolnost vůči tahu	5–7 Kg/cm

### 5.8.2 Kompozitní materiály

Na trhu jsou také kompozitní materiály s před nastavitelnými kombinacemi mechanických vlastností: Shore A40, Shore A50, Shore A60, Shore A70, Shore A85, Shore A95. [35]



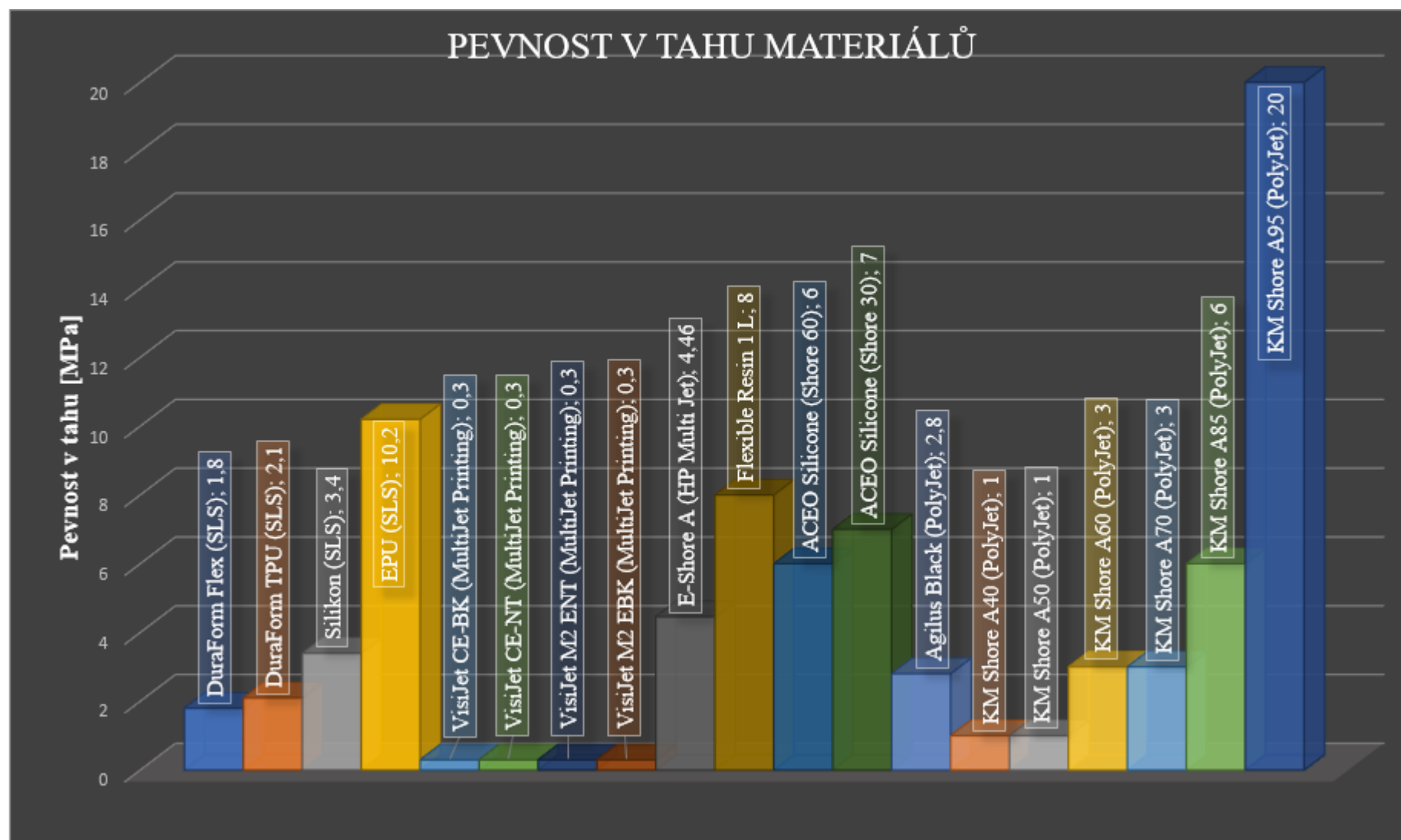
Obrázek 23: Kompozitní materiály PolyJet [35]

Tabulka 15: Vlastnosti kompozitních materiálů [35]

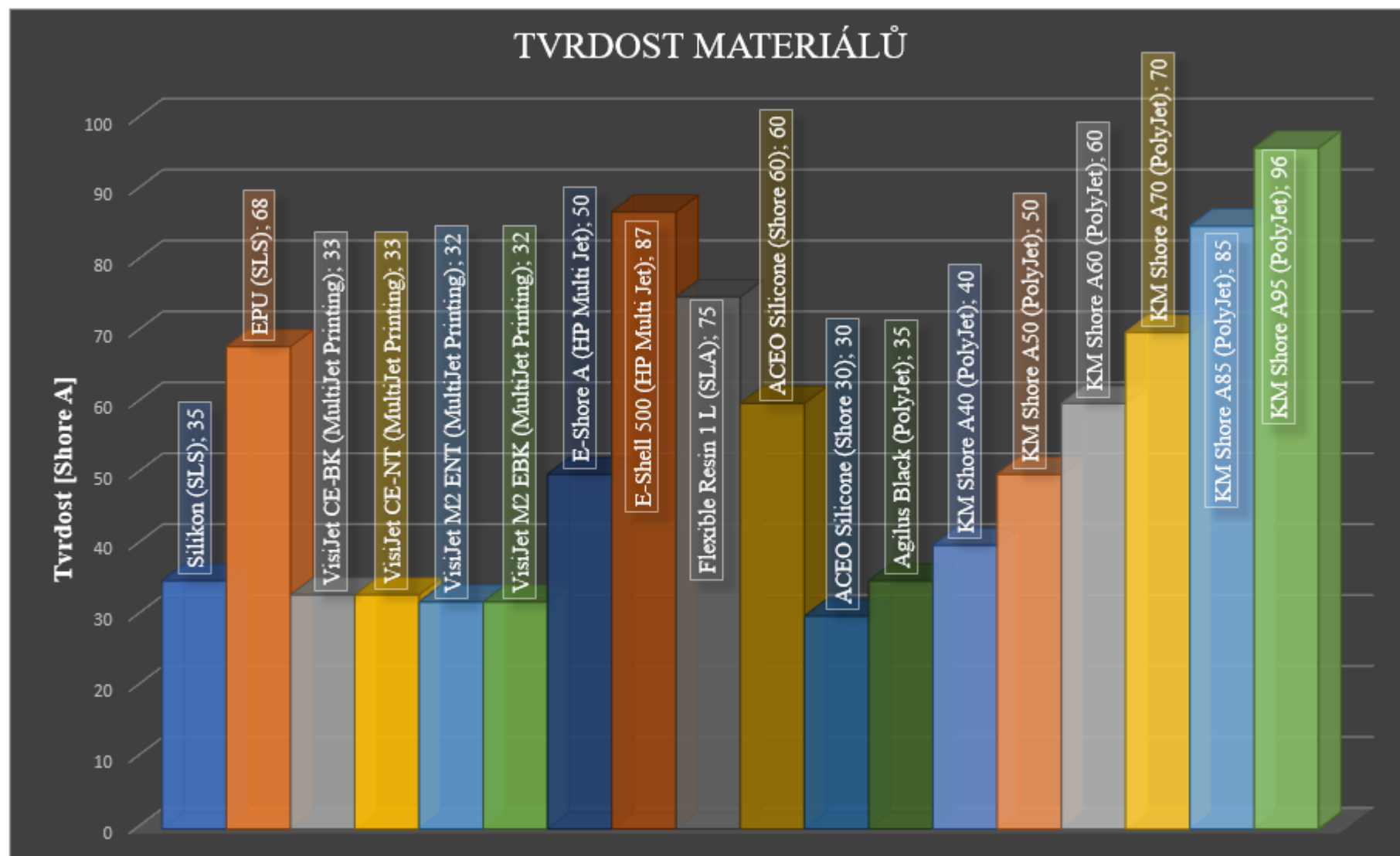
	Shore A40	Shore A50	Shore A60	Shore A70	Shore A85	Shore A95
Pevnost v tahu (MPa)	0,5–1,5	0,5–1,5	2–4	2–4	4–8	15–25
Prodloužení při přetržení (%)	150–170	130–150	80–100	50–70	50–60	25–35
Tvrдост (Shore A)	28–40 A	36–50 A	46–60 A	57–70 A	70–85 A	80–95 A
Barva	Černá	Černá	Černá	Černá	Černá	Černá

## 5.9 Porovnání mechanických vlastností materiálů

Na obrázku 24 a 25 můžeme vidět souhrnné tabulkové srovnání mechanických hodnot uváděných elastomerů. Konkrétně se jedná o pevnost v tahu a tvrdost materiálů.



**Obrázek 24:** Souhrnné tabulkové srovnání materiálů – pevnost v tahu



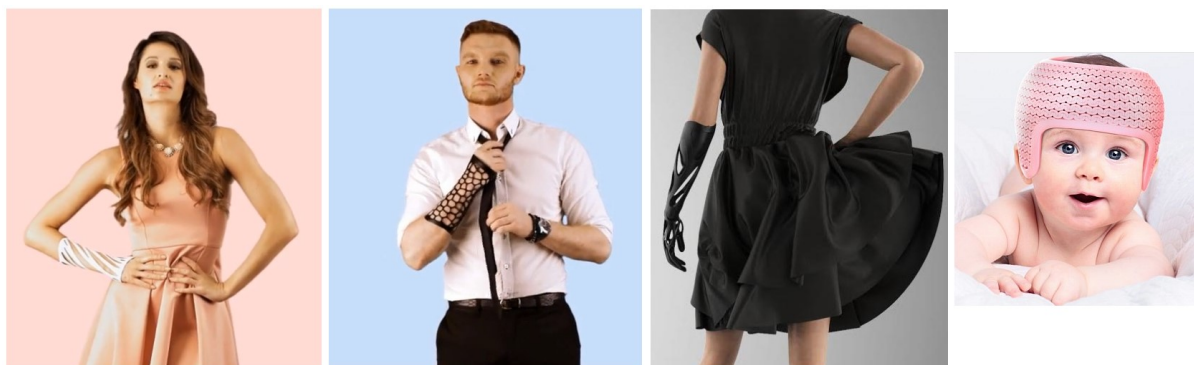
**Obrázek 25:** Souhrnné tabulkové srovnání materiálů – tvrdost

## 6 Stanovení cíle práce

Invent Medical Group s.r.o. je společnost sídlící v Ostravě a je zaměřená na výzkum a vývoj 3D tisku a použití této technologie v oblasti lékařství. Specializují se na výrobu ortopedických a protetických zdravotních pomůcek, převážně na helmy k léčbě deformit dětské lebky. Díky znalostí v oblasti zpracování dat a znalostí v medicíně se společnost dále rozvíjí a vytváří díky 3D skeneru dokonalé repliky protéz končetin nebo moderní a vzhledově příjemné ortézy.

Zatím firma Invent Medical pracovala převážně s plastem – nylon. Dokážou jeho mechanické vlastnosti pozměnit pomocí struktur či změny průřezu. Jelikož se 3D tisk stále rozvíjí, je mnoho možností jak nové technologie a nové materiály aplikovat do medicíny a přinést tak na trh důležité zdravotní pomůcky, které budou vyrobeny na míru pacientovi. Proto se teď společnost zaměřila na výzkum elastomerů, jejich chování a vlastností.

Na tomto výzkumu se budou podílet – firma Invent Medical, VUT Brno a VŠB-TU Ostrava (Katedra obrábění, montáže a strojírenské technologie a Katedra aplikované mechaniky).

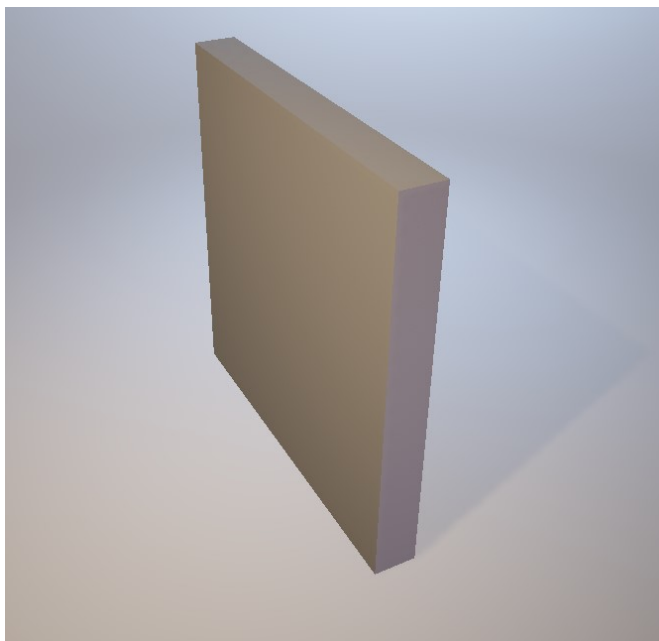


**Obrázek 26:** Výrobky firmy Invent Medical Group s.r.o. [36]

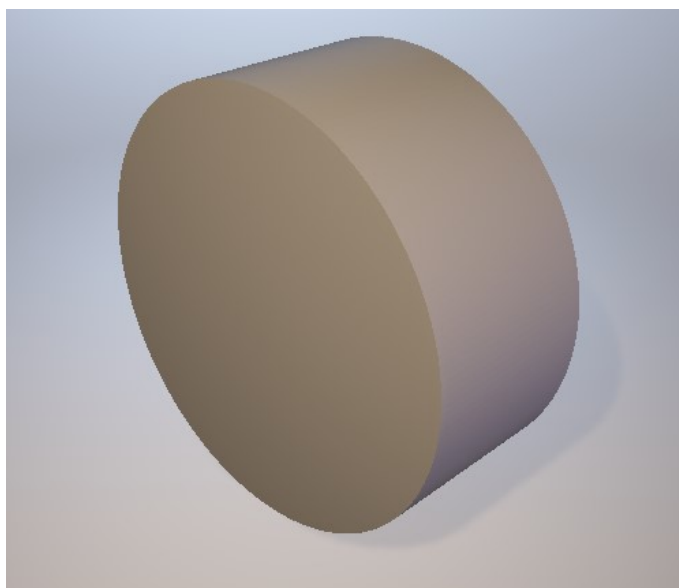
Cílem diplomové práce je porovnat dvě dané technologie 3D tisku a dva různé elastomery, které jsou dostupné na trhu. Zjistit, jestli se 3D tištěný elastomer chová stejně jako součást vyrobená konvenční metodou výroby. A v neposlední řadě navrhnout postup pro další výzkum těchto 3D tištěných elastomerů.

## 7 Výroba vzorků elastomerů na 3D tiskárně

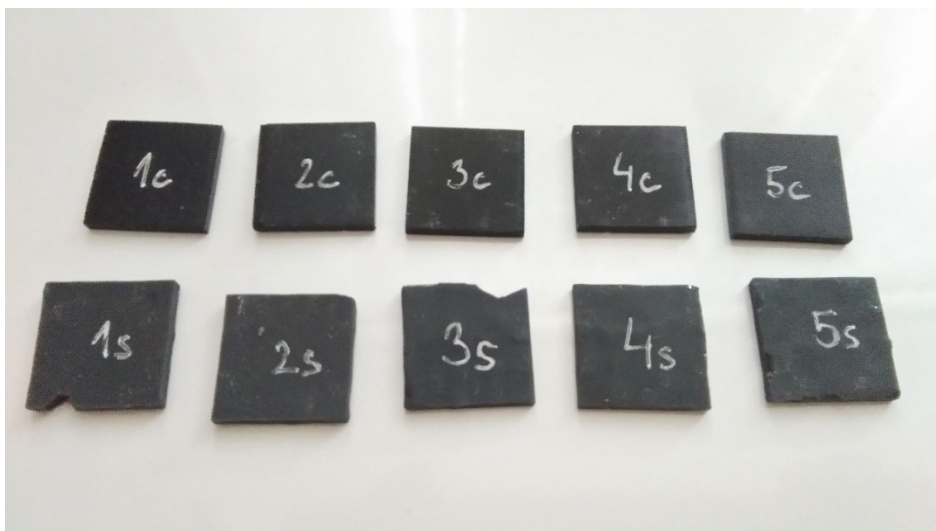
Vyrobené vzorky jsou navrženy pro speciální cyklické zkoušky elastomerů. Každou technologií je vytištěno 5 kusů daného vzorků pro přesnější vyhodnocení zkoušek. Pro dvouosou zkoušku jsou dány rozměry tištěného vzorku  $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  (viz obrázek 27). Pro zkoušku objemové stlačitelnosti válec o průměru 30 mm a výšce 13 mm (viz obrázek 28).



**Obrázek 27:** Model vzorku pro dvouosou zkoušku



**Obrázek 28:** Model vzorku pro zkoušku objemové stlačitelnosti



**Obrázek 29:** Vytiskněné vzorky pro dvouosou zkoušku

## 7.1 Tisk vzorků elastomeru pomocí SLA technologie

Tiskárnu Formlabs Form 2 a materiál Flexible poskytla firma Invent Medical Group s.r.o.

### 7.1.1 Tiskárna Formlabs Form 2

Tiskárna Form 2 umožňuje tisknout přesné modely s velmi dobrým povrchem. Tato tiskárna používá technologii SLA, která je popsána v kapitole 2.6. Velkou výhodou této tiskárny je vysoká spolehlivost a snadnost obsluhy. Díky široké nabídce originálních pryskyřic je tato tiskárna univerzální. Na trhu jsou uvedeny pryskyřice pro různá odvětví, například konstrukční pryskyřice, šperkařské, dentální či keramické. Formlabs tiskárny používají software Perform. [37]-[38]

Cena tiskárny Formlabs Form 2 se pohybuje okolo 4 000 – 6 000 USD.

**Tabulka 16:** Vlastnosti a parametry tiskárny Form 2 [37]

<b>Technologie tisku</b>	SLA
<b>Systém plnění pryskyřice</b>	Automatizovaný
<b>Tiskový prostor</b>	145 × 145 × 175 mm
<b>Přesnost vrstvy</b>	25, 50, 100 mikronů
<b>Velikost laserového bodu</b>	140 mikronů
<b>Výkon laseru</b>	250 mW
<b>Rozměry tiskárny</b>	350 × 330 × 520 mm
<b>Hmotnost tiskárny</b>	13 kg
<b>Podporované formáty dat</b>	STL, OBJ
<b>Přenos dat</b>	WiFi, LAN, USB





**Obrázek 30:** Tiskárna Formlabs Form 2 [37]

### **7.1.2 Materiál Flexible**

Formlabs Flexibilní pryskyřice má elastomerní vlastnosti. Mohou být tištěny na tiskárně Formlabs Form 1+ a Form 2. Součásti jsou ohýbatelné, stlačitelné a poddajné. Mohou se vyrábět díly, jako jsou rukojeti, klávesnice nebo těsnění. [37]

Vlastnosti materiálu jsou popsány v kapitole 5.6.1 a mohou se lišit podle geometrie dílu, orientace tisku, nastavení tisku a teploty.

## **7.2 Tisku vzorků elastomeru pomocí technologie Carbon CLIP**

Vzorky vytištěné pomocí technologie CLIP byly vytištěny na zakázku firmou Citim/Oerlikon v Německu.

### **7.2.1 Tiskárna Carbon M2**

Tiskárna Carbon M2 je druhá tiskárna, kterou představila společnost Carbon a tiskne pomocí technologie CLIP. Technologie CLIP funguje tak, že promítá světlo, přes okno propustné pro kyslík, na zásobník UV vytvrditelné pryskyřice. Podrobnější popis principu této technologie se nachází v kapitole 2.2. Proces tisku je 25 až 100krát rychlejší než běžné 3D tiskové technologie. Další výhodou je vytvoření 3D objektů bez slabých míst mezi vrstvami. Cena tiskárny se pohybuje okolo 160 000 USD. [4]

**Tabulka 17:** Vlastnosti a parametry tiskárny Carbon M2 [4]

<b>Technologie tisku</b>	CLIP
<b>Tiskový prostor</b>	189 × 118 × 326 mm
<b>Přenos dat</b>	WiFi



**Obrázek 31:** Tiskárna Carbon M2 [4]

### 7.2.2 Materiál EPU 40

Tento materiál je elastický a má vysokou odolnost proti roztržení až 26 kN/m. Je vhodný pro výrobu součástí, které slouží k tlumení, izolaci vibrací nebo těsnění. [27]

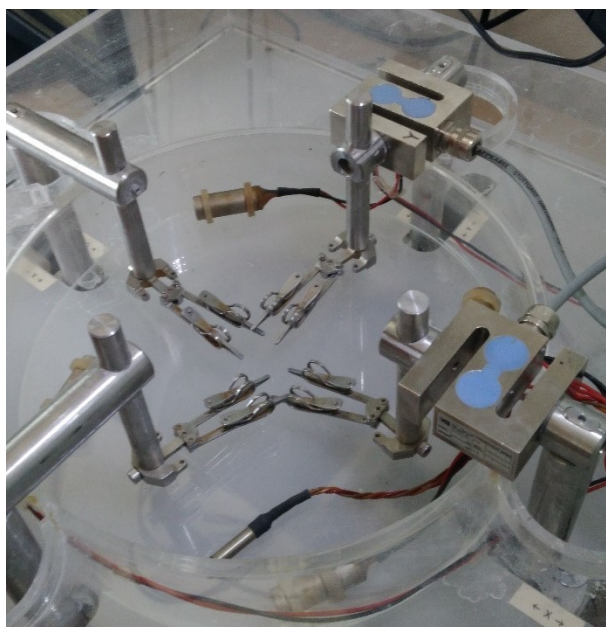
Vlastnosti materiálu jsou popsány v kapitole 5.2.2. Výrobci upozorňují, že se vlastnosti součástí mohou lišit podle geometrie dílů, orientaci tisku, nastavení tisku a teploty.

## 8 Zkoušky elastomerů

### 8.1 Zkouška elastomerů – dvouosá zkouška

Dvouosá zkouška tahem se používá k určení deformačních vlastností materiálu. Tento test se používá především pro výzkum a vývoj, neboť umožňuje stanovit hodnoty napětí v oblasti průniku vzorku, který má být zkoumán. Měření napětí se provádí bezkontaktní extenzometrií pomocí kamery a následné analýzy obrazu v postprocessingu.

Zařízení pro dvouosou zkoušku poskytlo Vysoké učení technické v Brně. Zařízení je vyrobeno přímo na VUT v Brně a je primárně určené ke zjišťování mechanických vlastností měkkých tkání (tepen, žil, chlopní, vazů, kůže apod.) a elastomerů. Zařízení se skládá ze čtyř svorek, z toho jsou dvě posuvné ve směru X a Y. (viz obrázek 32)



**Obrázek 32:** Zařízení pro dvouosou zkoušku

#### 8.1.1 Postup zkoušení vzorků elastomerů

##### 1. Označení vzorků

Každý vzorek byl označen na jedné straně číslem a písmenem podle technologie výroby. Tedy například první vzorek vyrobený technologií CLIP byl označen „1c“, třetí vzorek vyrobený technologií SLA „3s“.

## 2. Měření rozměrů vzorků

Kvůli následnému vyhodnocování výsledků zkoušky, byly rozměry vzorku změřeny digitálním posuvným měřítkem. Měřil se rozměr x, y a tloušťka vzorku. Pro vyhodnocení v postprocessingu se tloušťka materiálu musela naměřit třikrát a byla dále použita nejnižší naměřená hodnota (viz tabulka 18).

**Tabulka 18:** Naměřené rozměry vzorků

SLA					
	1	2	3	4	5
x [mm]	17,82	17,80	17,83	17,83	17,84
y [mm]	17,75	17,72	17,77	17,70	17,73
t [mm]	2,10	2,08	2,06	<b>2,05</b>	2,05
	2,08	2,04	<b>2,04</b>	2,08	2,04
	<b>2,07</b>	<b>2,04</b>	2,05	2,06	<b>2,04</b>
CLIP					
	1	2	3	4	5
x [mm]	17,54	17,64	17,55	17,54	17,54
y [mm]	17,51	17,60	17,60	17,50	17,50
t [mm]	1,93	1,93	1,96	1,95	1,96
	<b>1,92</b>	1,92	<b>1,94</b>	1,94	<b>1,94</b>
	1,93	<b>1,92</b>	1,96	<b>1,94</b>	1,95

## 3. Zaznačení markerů na vzorcích

Na každém vzorku se pomocí šablony a bílého fixu zakreslilo osm čar, za které budou uchyceny svorky. Doprostřed vzorku byly zakresleny čtyři markery, díky kterým je snímána a vyhodnocována deformace vzorku. Zakreslené markery můžeme vidět na obrázku 33.

Jelikož mají vzorky tištěnou strukturu, která jde vidět na první pohled, je nutné uchytit vzorky pokaždé stejně. K tomu slouží zabělené rohy na vzorku, které nám značily uchycení ve směru X. Tímto bylo zajištěno, že u vzorků vytištěných technologií CLIP byla stopa struktury kolmá na směr X a u vzorků vytištěných technologií SLA svíraly stopy struktury a směr X úhel 135°.



**Obrázek 33:** Zakreslené markery na vzorku

#### **4. Uchycení vzorku do zařízení**

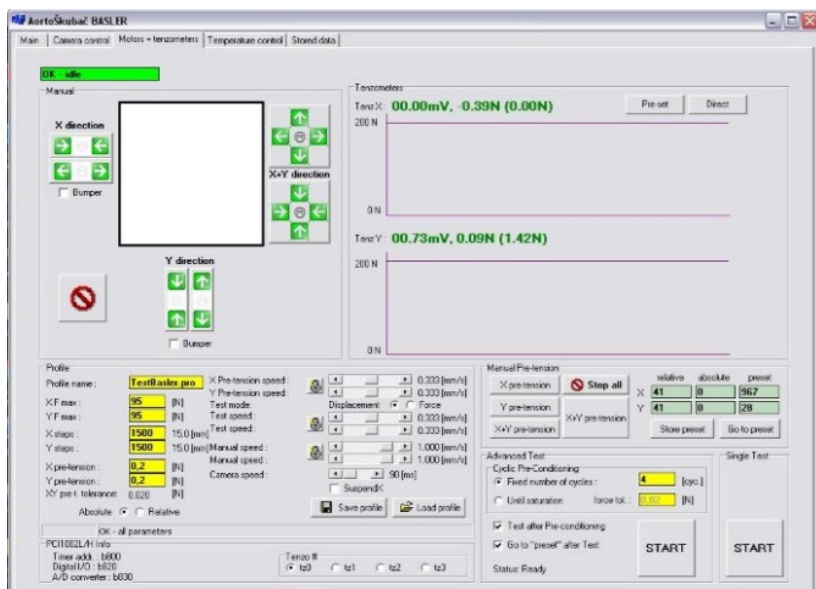
Vzorek byl uchycen do zařízení pomocí osmi svorek. Zakreslených osm čar na vzorku nám slouží na to, abychom vzorek uchytli pokaždé stejně a abychom zajistili rovnoměrné rozložení napětí po celém průřezu vzorku. Zabělené rohy vždy směřovaly k pravým svorkám ve směru X. Vzorek se uchytíl do pevných dvou svorek, poté se s posuvnými svorkami posouvalo ve směru X a Y tak, aby uchytily další dvě strany a aby se konce svorek nacházely 2 mm od hrany vzorku. Správně uchycený vzorek v zařízení můžeme vidět na obrázku 34.



**Obrázek 34:** Uchycený vzorek v zařízení

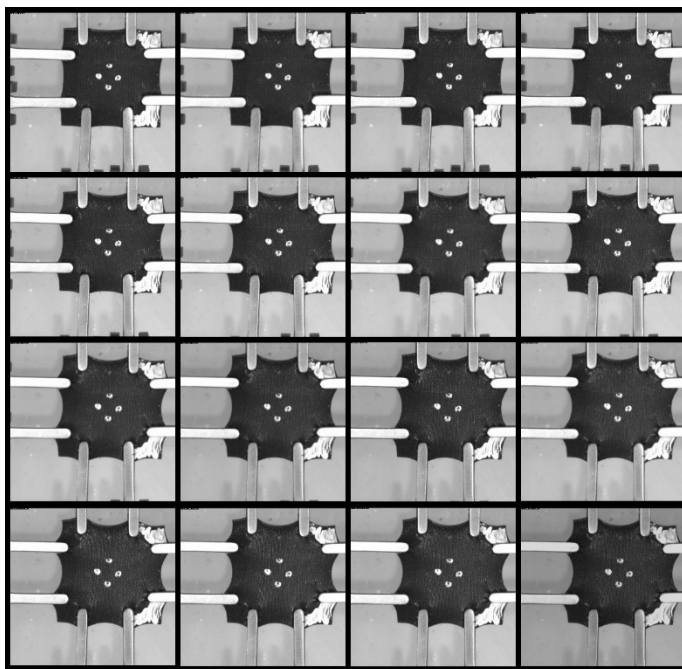
## 5. Nastavení programu BASLER

V programu BASLER se vynulovaly síly, které na vzorek působily upnutím. Nastavily se hodnoty maximální síly, hodnoty předpětí a kroky v mm ve směru X a Y. Dále se mohou upravit rychlosti cyklického namáhání ve směru X a Y a počet cyklů.



Obrázek 35: Nastavení parametrů v programu BASLER

Po spuštění programu se vzorek začne cyklicky namáhat, kamera snímá pohyby vzorku a ukládá nasnímané obrázky zkoušeného vzorku ve formátu .tif do počítače. Vždy se ukládá poslední cyklus namáhání.



Obrázek 36: Série nasnímaných obrázků zkoušeného vzorku



## 6. Postprocessing pomocí programu Tibixus

Po odzkoušení všech vzorků se vyhodnocují výsledky pomocí analýzy obrazu v postprocessingu. Pro analýzu programu byl použit program Tibixus, který pomocí sérií nasnímaných obrázků zkoušeného vzorku vypočítá data, která jsou potřebná k vytvoření napětově deformační křivky. Zde byly potřebné naměřené rozměry vzorků, které se zadávaly pro vyhodnocení výsledků. Tloušťka vzorku  $t$  byla vždy zadávaná nejnižší naměřená. Tibixus pomocí algoritmu dokáže ze zakreslených markerů vypočítat poměrné protažení daného vzorku na základě změny polohy teček v průběhu měření. Výsledkem je textový soubor s hodnotami viz obrázek 37.

CLIP\_vz1\_X\_Y\_after pre - Poznámkový blok

Soubor

Uprava

Formát

Zobrazení

Návodě

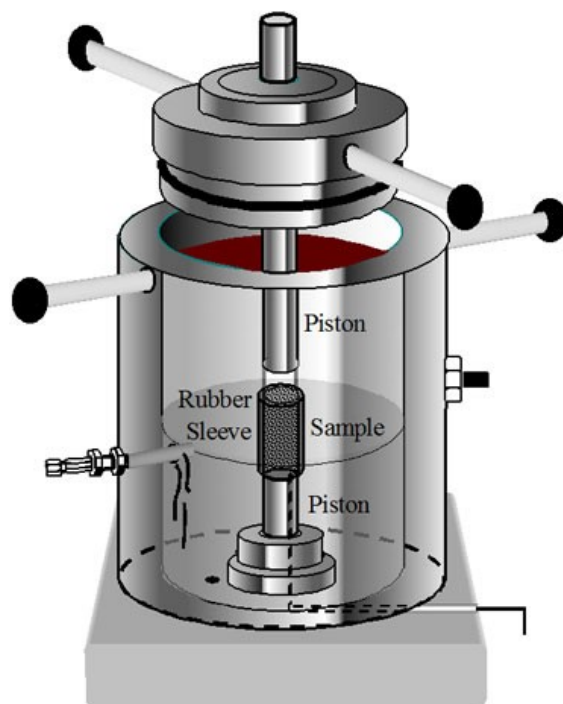
Image file name	F11	F12	F21	F22	Ld 1	Ld 2	Phi	Beta	Ld x	Ld y	Tz x	Tz y	L0 x	L0 y	T0	L x	L y	T	S x	S y
img00001.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0008	1.0001	-0.02	2.99	1.0001	1.0008	0.960	1.230	17.50	17.50	1.920	17.50	17.51	1.918	0.02857	
img00002.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0002	0.9999	-0.02	-43.4	1.0000	1.0000	1.450	1.610	17.50	17.50	1.920	17.50	17.50	1.920	0.04316	
img00003.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0007	1.0000	-0.02	-19.6	1.0001	1.0006	1.740	1.420	17.50	17.50	1.920	17.50	17.51	1.919	0.05179	
img00004.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0006	0.9996	-0.02	-6.42	0.9996	1.0006	2.020	1.420	17.50	17.50	1.920	17.49	17.51	1.920	0.06005	
img00005.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0005	1.0002	-0.04	-15.6	1.0003	1.0005	2.410	1.800	17.50	17.50	1.920	17.50	17.51	1.919	0.07174	
img00006.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0010	1.0005	-0.04	-16.8	1.0005	1.0009	2.700	2.080	17.50	17.50	1.920	17.51	17.52	1.917	0.08046	
img00007.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0020	1.0009	-0.03	10.9	1.0010	1.0020	2.990	2.180	17.50	17.50	1.920	17.52	17.53	1.914	0.08907	
img00008.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0028	1.0016	-0.05	-41.9	1.0023	1.0021	3.280	2.270	17.50	17.50	1.920	17.54	17.54	1.912	0.09784	
img00009.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0036	1.0027	-0.07	-35.4	1.0033	1.0030	3.570	2.180	17.50	17.50	1.920	17.56	17.55	1.908	0.10666	
img00010.tif	1.00	-0.00	-0.00	1.00	1.0041	1.0026	-0.11	-39.1	1.0035	1.0032	3.760	2.370	17.50	17.50	1.920	17.56	17.56	1.907	0.11236	
img00011.tif	1.01	-0.00	-0.00	1.00	1.0051	1.0029	-0.12	-7.78	1.0050	1.0030	3.950	2.560	17.50	17.50	1.920	17.59	17.55	1.905	0.11815	
img00012.tif	1.01	-0.00	-0.00	1.00	1.0057	1.0024	-0.18	-25.2	1.0051	1.0030	4.340	2.750	17.50	17.50	1.920	17.59	17.55	1.905	0.12983	
img00013.tif	1.01	-0.00	-0.00	1.00	1.0066	1.0024	-0.20	-10.1	1.0065	1.0026	4.630	3.030	17.50	17.50	1.920	17.61	17.55	1.903	0.13865	
img00014.tif	1.01	-0.00	-0.00	1.00	1.0076	1.0019	-0.20	-9.88	1.0074	1.0021	4.820	3.120	17.50	17.50	1.920	17.63	17.54	1.902	0.14452	
img00015.tif	1.01	-0.00	-0.00	1.00	1.0081	1.0026	-0.21	-11.7	1.0078	1.0028	5.110	3.120	17.50	17.50	1.920	17.64	17.55	1.900	0.15328	
img00016.tif	1.01	-0.00	-0.00	1.00	1.0094	1.0026	-0.22	-8.83	1.0092	1.0028	5.400	3.310	17.50	17.50	1.920	17.66	17.55	1.897	0.16215	
img00017.tif	1.01	-0.00	0.01	1.00	1.0105	1.0028	-0.25	-9.76	1.0103	1.0030	5.980	3.500	17.50	17.50	1.920	17.68	17.55	1.895	0.17081	
img00018.tif	1.01	-0.00	0.01	1.00	1.0112	1.0036	-0.26	-7.22	1.0110	1.0038	6.070	3.690	17.50	17.50	1.920	17.69	17.57	1.892	0.18265	
img00019.tif	1.01	-0.00	0.01	1.00	1.0124	1.0038	-0.23	-10.0	1.0121	1.0041	6.360	3.690	17.50	17.50	1.920	17.71	17.57	1.889	0.19158	
img00020.tif	1.01	-0.00	0.01	1.00	1.0140	1.0039	-0.26	-7.39	1.0138	1.0040	6.650	3.690	17.50	17.50	1.920	17.74	17.57	1.886	0.20065	
img00021.tif	1.02	-0.00	0.01	1.00	1.0152	1.0036	-0.31	-5.91	1.0151	1.0037	6.840	4.070	17.50	17.50	1.920	17.76	17.57	1.884	0.20665	
img00022.tif	1.02	-0.00	0.01	1.00	1.0162	1.0041	-0.32	-6.35	1.0161	1.0043	7.040	4.260	17.50	17.50	1.920	17.78	17.58	1.882	0.21289	
img00023.tif	1.02	-0.00	0.01	1.00	1.0165	1.0045	-0.33	-7.02	1.0163	1.0047	7.420	4.540	17.50	17.50	1.920	17.79	17.58	1.880	0.22444	
img00024.tif	1.02	-0.00	0.01	1.00	1.0170	1.0037	-0.33	-5.14	1.0169	1.0038	7.620	4.640	17.50	17.50	1.920	17.80	17.57	1.881	0.23061	
img00025.tif	1.02	-0.00	0.01	1.00	1.0182	1.0048	-0.36	-5.92	1.0180	1.0050	7.810	4.830	17.50	17.50	1.920	17.82	17.59	1.877	0.23663	
img00026.tif	1.02	-0.01	0.01	1.00	1.0192	1.0048	-0.38	-5.50	1.0191	1.0049	8.000	5.210	17.50	17.50	1.920	17.83	17.59	1.875	0.24263	
img00027.tif	1.02	-0.01	0.01	1.01	1.0201	1.0051	-0.42	-6.39	1.0199	1.0053	8.480	5.210	17.50	17.50	1.920	17.85	17.59	1.873	0.25741	
img00028.tif	1.02	-0.01	0.01	1.01	1.0209	1.0053	-0.43	-5.86	1.0207	1.0055	8.580	5.300	17.50	17.50	1.920	17.86	17.60	1.871	0.26064	
img00029.tif	1.02	-0.01	0.01	1.01	1.0219	1.0062	-0.44	-5.50	1.0218	1.0064	8.770	5.400	17.50	17.50	1.920	17.88	17.61	1.867	0.26669	
img00030.tif	1.02	-0.01	0.01	1.01	1.0230	1.0058	-0.45	-5.27	1.0228	1.0060	9.160	5.300	17.50	17.50	1.920	17.90	17.61	1.866	0.27884	
img00031.tif	1.02	-0.01	0.01	1.01	1.0239	1.0059	-0.43	-7.31	1.0236	1.0062	9.260	5.490	17.50	17.50	1.920	17.91	17.61	1.864	0.28209	
img00032.tif	1.02	-0.01	0.01	1.01	1.0239	1.0055	-0.45	-4.29	1.0238	1.0056	9.540	5.590	17.50	17.50	1.920	17.92	17.60	1.865	0.29069	
img00033.tif	1.03	-0.01	0.01	1.01	1.0253	1.0052	-0.49	-3.76	1.0252	1.0052	9.830	6.060	17.50	17.50	1.920	17.94	17.59	1.863	0.29993	
img00034.tif	1.03	-0.01	0.01	1.01	1.0259	1.0052	-0.48	-4.09	1.0258	1.0053	10.22	6.150	17.50	17.50	1.920	17.95	17.59	1.862	0.31200	
img00035.tif	1.03	-0.01	0.01	1.01	1.0275	1.0052	-0.50	-3.71	1.0274	1.0053	10.51	6.440	17.50	17.50	1.920	17.98	17.59	1.859	0.32136	
img00036.tif	1.03	-0.01	0.01	1.01	1.0280	1.0058	-0.54	-4.63	1.0278	1.0059	10.80	7.010	17.50	17.50	1.920	17.99	17.60	1.857	0.33037	

Obrázek 37: Textový soubor s vypočtenými hodnotami programem Tibixus

## 8.2 Zkouška objemové stlačitelnosti

Zařízení poskytl a zkoušku provedl ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky na Vysokém učení technickém v Brně.

Tato zkouška se provádí pro zjištění odporu materiálu při změně objemu. Ze zkoušky lze zjistit modul objemové pružnosti materiálu. Při této zkoušce je válcový vzorek umístěn do válce a poté vystaven tlakové síle v axiálním směru válce. Princip zkoušky je znázorněn na obrázku 38.



**Obrázek 38:** Princip zkoušky objemové stlačitelnosti [40]



## 9 Vyhodnocení zkoušek

Jestliže je těleso zatěžováno vnějšími silami, těleso se deformuje a mění svůj tvar nebo objem v závislosti na svých mechanických vlastnostech, a to přesněji na svém modulu objemové pružnosti  $K$  a tuhosti tvaru  $k$ . Deformace, která bude v tělese vznikat závisí na poměru těchto dvou mechanických vlastností. Například pro ideální kapalinu platí, že klade velmi malý odpor při změně tvaru, ale brání se však změnám objemu. Její modul objemové pružnosti je nulový a je tedy zcela nestlačitelná. Pro elastomery je velmi důležitá míra jejich objemové stlačitelnosti a platí pravidlo:

*„Materiál lze považovat za objemově přibližně nestlačitelný tehdy, je-li jeho objemový modul pružnosti o několik řádů vyšší než jeho modul pružnosti ve smyku, takže změna tvaru při zatížení naprosto převažuje nad změnou objemovou.“* Burša Jiří (2006, s. 6)

Při velmi velkých deformacích elastomerů (až stovky procent) není chování těchto materiálů zcela elastické, ale vykazuje se tzv. cyklické změkčení, trvalé deformace, stárnutí a Mullinsův efekt (viz kapitola 3.2.3).

V této diplomové práci jsou porovnány modul objemové pružnosti a tuhost tvaru elastomeru pomocí dvou zkoušek. Modul objemové pružnosti byl získán pomocí zkoušky objemové stlačitelnosti a tuhost tvaru byla získána z deformačně napět'ových grafů.

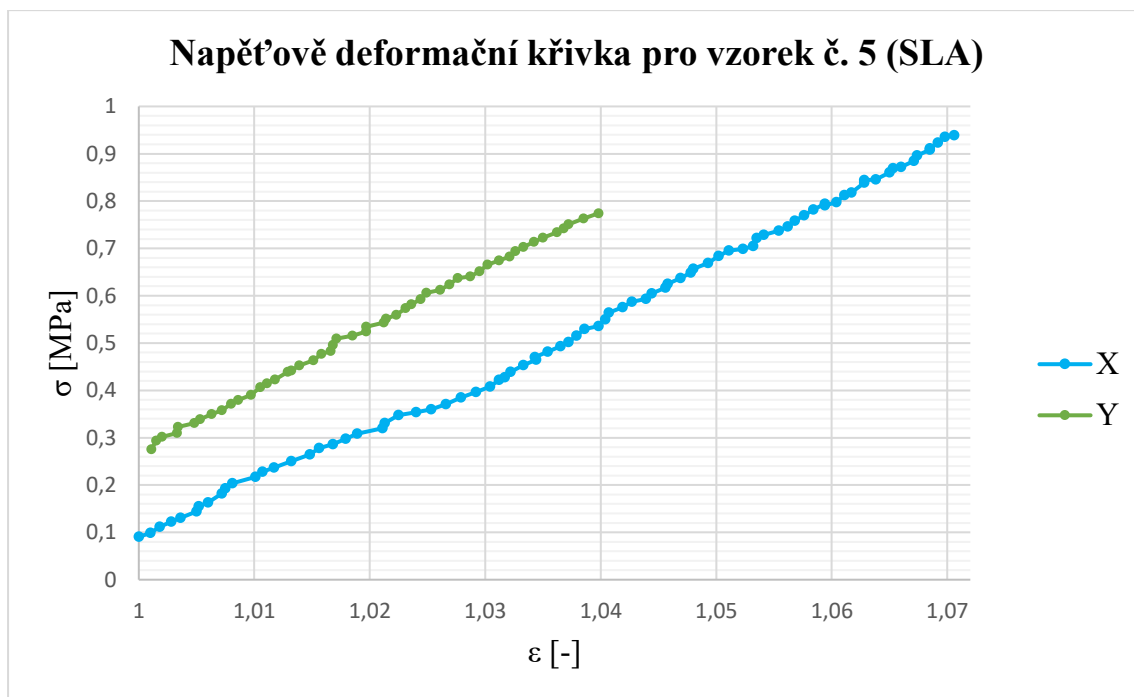
Je nutno uvést, že výsledky v této práci platí pro rozsah do 10 % deformace daných materiálů. Pro rozsah vyšší deformace se výsledky mohou lišit.

### 9.1 Vyhodnocení dvouosé zkoušky

#### 9.1.1 Vyhodnocení dvouosé zkoušky – technologie SLA

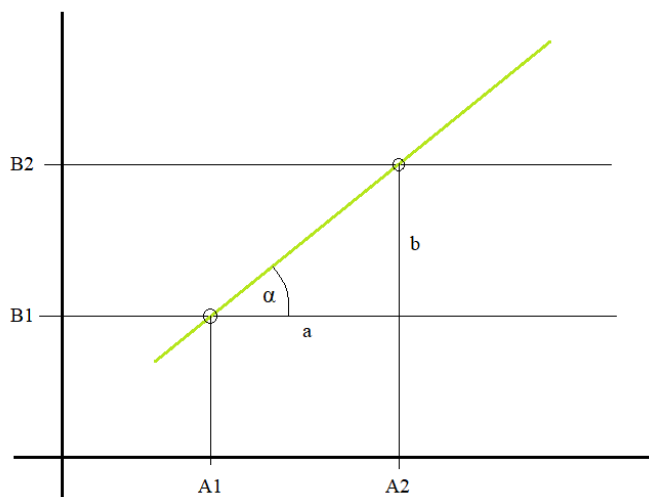
Pomocí programu Tibixus byl získán textový soubor s výslednými hodnotami zkoušky. Díky těmto hodnotám je možné vytvořit napět'ově deformační křivku pro každý zkoušený vzorek. Pro příklad je na obrázku 39 znázorněna napět'ově deformační křivka pro vzorek č. 5 vyrobený technologií SLA.

Při vizuálním vyhodnocení grafu můžeme konstatovat, že křivky pro směr X i Y jsou lineární v rozsahu do 7 %.



**Obrázek 39:** Graf napětově deformační křivky pro vzorek č. 5 (SLA)

Jelikož je vizuální vyhodnocení nepřesné, dá se pomocí sečen určit, zda je křivka klesající, rostoucí či lineární. Níže je uveden postup.

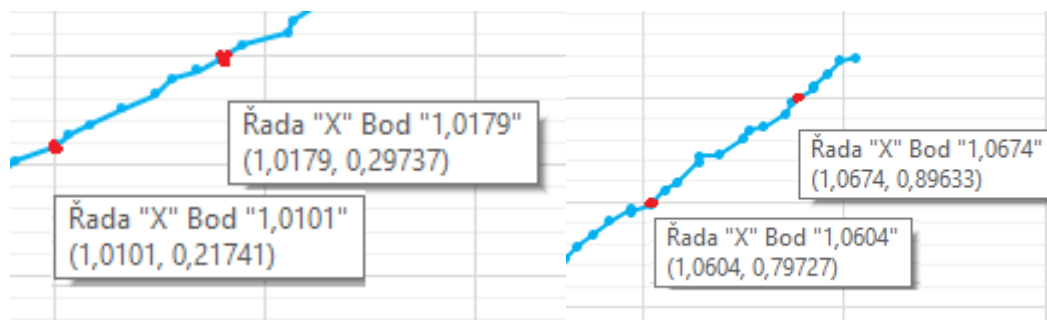


**Obrázek 40:** Schéma pro výpočet tvarové tuhosti vzorku pomocí sečny

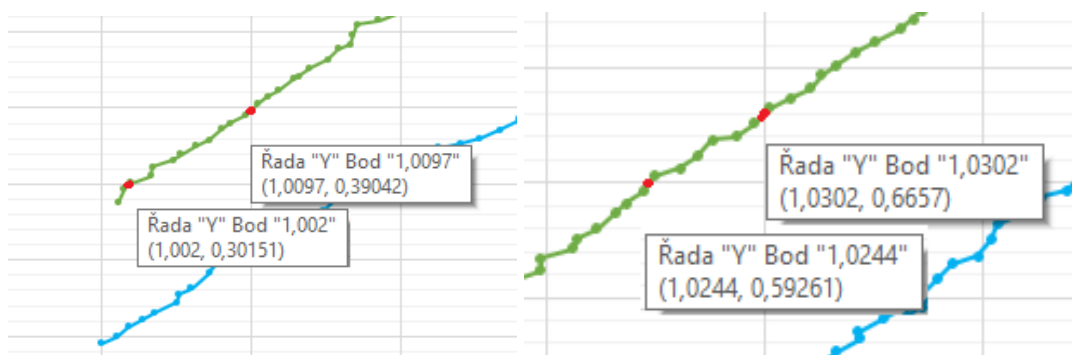
Pomocí odvěsen vzniklého trojúhelníku a goniometrických funkcí vypočítáme směrnici  $\tan \alpha$  na začátku a na konci křivky a výsledný rozdíl mezi směrnici nám určí, zda je křivka rostoucí či klesající. Tato směrnice je zároveň i tvarová tuhost vzorku. K výpočtu použijeme goniometrickou funkci tangens (1).

$$\tan \alpha = \frac{b}{a} = \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1} \quad (1)$$

Potřebné hodnoty pro výpočet odečteme z grafu napětově deformační křivky (viz obrázek 41 a 42).



**Obrázek 41:** Hodnoty pro výpočet z grafu napětově deformační křivky pro vzorek č.5 (SLA) pro směr X (vlevo – na začátku křivky, vpravo – na konci křivky)



**Obrázek 42:** Hodnoty pro výpočet z grafu napětově deformační křivky pro vzorek č.5 (SLA) pro směr Y (vlevo – na začátku křivky, vpravo – na konci křivky)

#### Příklad výpočtu pro vzorek č.5 (SLA) pro směr X

- Pro sečnu na začátku křivky, značeno i

$$k_{xi} = \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1}$$

$$k_{xi} = \frac{0,29737 - 0,21741}{1,0179 - 1,0101}$$

$$k_{xi} = 10,25 \text{ MPa}$$

- Pro sečnu na konci křivky, značeno n

$$k_{xn} = \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1}$$

$$k_{xn} = \frac{0,89633 - 0,79727}{1,0674 - 1,0604}$$

$$k_{xn} = 14,15 \text{ MPa}$$

Příklad výpočtu pro vzorek č.5 (SLA) pro směr Y

- Pro sečnu na začátku křivky, značeno i

$$k_{yi} = \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1}$$

$$k_{yi} = \frac{0,39042 - 0,30151}{1,0097 - 1,002}$$

$$k_{yi} = \mathbf{11,55 \text{ MPa}}$$

- Pro sečnu na konci křivky, značeno n

$$k_{yn} = \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1}$$

$$k_{yn} = \frac{0,6657 - 0,59261}{1,0302 - 1,0244}$$

$$k_{yn} = \mathbf{12,60 \text{ MPa}}$$

Tyto výpočty byly provedeny pro každý vzorek vyrobený technologií SLA, který nebyl při zkoušce porušen přetržením. Výsledky jsou zapsány v tabulce 19.

**Tabulka 19:** Výsledky směrnic deformačně napěťové křivky pro vzorky SLA

SLA				
	$k_x[\text{MPa}]$		$k_y [\text{MPa}]$	
	i	n	i	n
Vzorek 1	-	-	-	-
Vzorek 2	11,50	10,00	16,54	12,00
Vzorek 3	-	-	-	-
Vzorek 4	10,50	13,27	11,13	11,31
Vzorek 5	10,25	14,15	11,55	12,60

$$\Delta k_x = k_{xn} - k_{xi} \quad (2)$$

$$\Delta k_x = 14,15 - 10,25$$

$$\Delta \alpha_x = \mathbf{3,9 \text{ MPa}}$$

Rozdíl mezi směrnicemi sečen na začátku křivky a na konci křivky se vypočítá podle rovnice (2). Výsledné hodnoty pro všechny vzorky jsou zapsány v tabulce 20.

**Tabulka 20:** Výsledné rozdíly směrnic sečen (SLA)

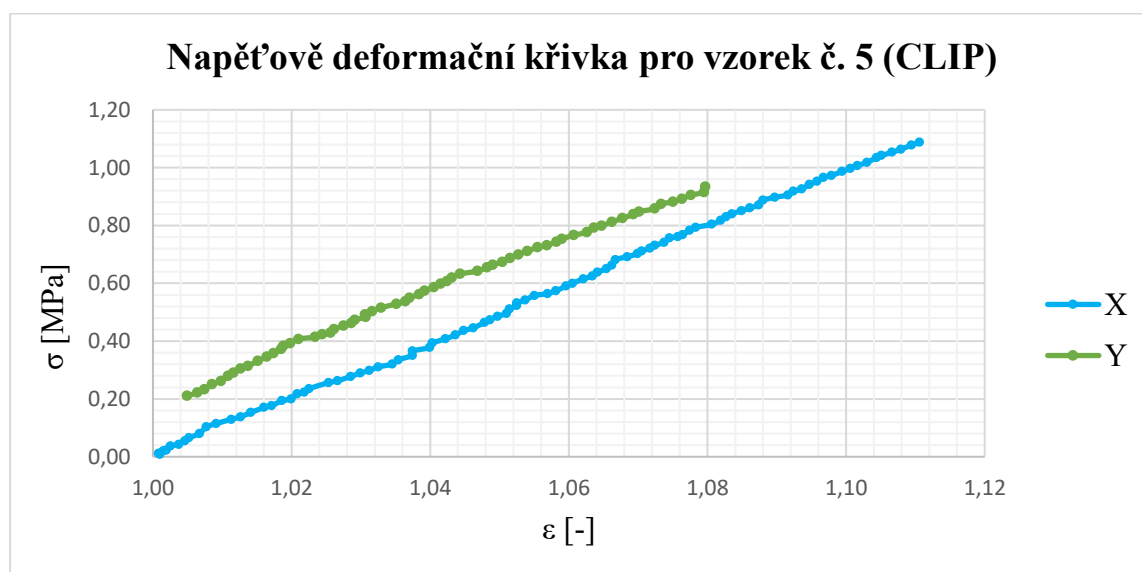
SLA		
	$\Delta k_x$ [MPa]	$\Delta k_y$ [MPa]
Vzorek 1	-	-
Vzorek 2	-1,50	-4,54
Vzorek 3	-	-
Vzorek 4	2,77	0,18
Vzorek 5	3,90	1,05

Z výsledných hodnot lze vyčíst, že všechny křivky pro vzorky SLA se v rozsahu do 7 % deformace chovají lineárně. Pokud zanedbáme rozdíl do 5 MPa. Lze tedy potvrdit tvrzení z vizuálního posouzení grafu.

### 9.1.2 Vyhodnocení dvouosé zkoušky – technologie CLIP

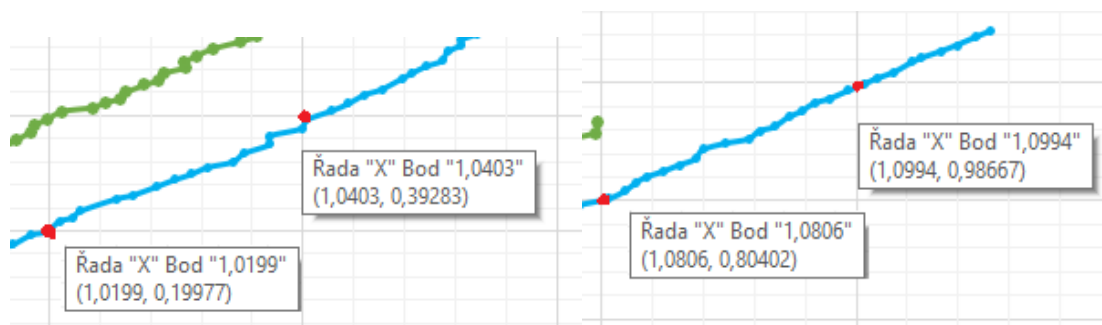
Taktéž jako u vyhodnocení technologie SLA, byl pomocí programu Tibixus získán textový soubor s výslednými hodnotami zkoušky a díky těmto hodnotám je možné vytvořit napět'ově deformační křivku pro každý zkoušený vzorek. Pro příklad je na obrázku 43 znázorněna napět'ově deformační křivka pro vzorek č. 5 vyrobený technologií CLIP.

Při vizuálním vyhodnocení grafu můžeme konstatovat, že křivky pro směr X i Y jsou lineární v rozsahu do 10 %.

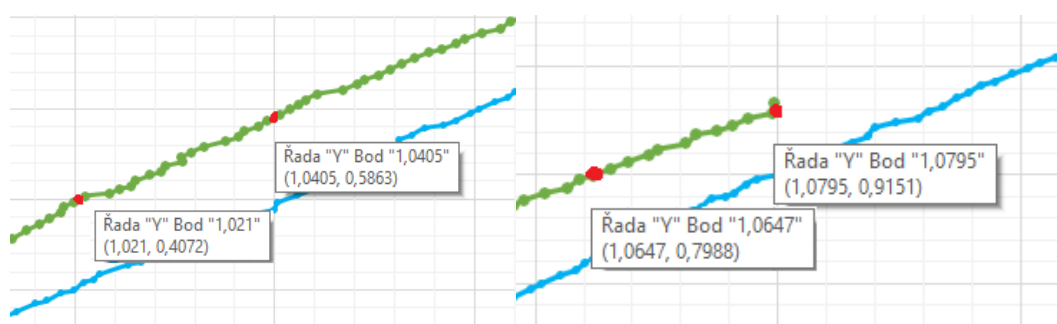


**Obrázek 43:** Graf napět'ově deformační křivky pro vzorek č. 5 (CLIP)

Taktéž pro tuto technologii odečteme potřebné hodnoty pro výpočet z grafu napětově deformační křivky (viz obrázek 44 a 45).



**Obrázek 44:** Hodnoty pro výpočet z grafu napětově deformační křivky pro vzorek č.5 (CLIP) pro směr X



**Obrázek 45:** Hodnoty pro výpočet z grafu napětově deformační křivky pro vzorek č.5 (CLIP) pro směr Y

#### Příklad výpočtu pro vzorek č.5 (CLIP) pro směr X

- Pro sečnu na začátku křivky, značeno i

$$k_{xi} = \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1}$$

$$k_{xi} = \frac{0,39283 - 0,19977}{1,0403 - 1,0199}$$

$$k_{xi} = 9,46 \text{ MPa}$$

- Pro sečnu na konci křivky, značeno n

$$k_{xn} = \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1}$$

$$k_{xn} = \frac{0,98667 - 0,80402}{1,0994 - 1,0806}$$

$$k_{xn} = 9,72 \text{ MPa}$$

Příklad výpočtu pro vzorek č.5 (CLIP) pro směr Y

- Pro sečnu na začátku křivky, značeno i

$$k_{yi} = \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1}$$

$$k_{yi} = \frac{0,5863 - 0,4072}{1,0405 - 1,021}$$

$$k_{yi} = 9,18 \text{ MPa}$$

- Pro sečnu na konci křivky, značeno n

$$k_{yn} = \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1}$$

$$k_{yn} = \frac{0,9151 - 0,7988}{1,0795 - 1,0647}$$

$$k_{yn} = 7,86 \text{ MPa}$$

Tyto výpočty byly provedeny pro každý vzorek vyrobený technologií CLIP. Výsledky jsou zapsány v tabulce 21.

**Tabulka 21:** Výsledky směrnic deformačně napět'ové křivky pro vzorky CLIP

CLIP				
	$k_x[\text{MPa}]$		$k_y[\text{MPa}]$	
	i	n	i	n
Vzorek 1	10,14	11,07	8,80	7,59
Vzorek 2	-	-	-	-
Vzorek 3	10,42	10,58	11,66	9,30
Vzorek 4	7,27	8,78	9,55	7,83
Vzorek 5	9,46	9,72	9,18	7,86

$$\Delta k_x = k_{xn} - k_{xi} \quad (2)$$

$$\Delta k_x = 9,72 - 9,46$$

$$k_x = 0,26 \text{ MPa}$$

Rozdíl směrnic sečen na začátku křivky a na konci křivky se vypočítá podle rovnice (2). výsledné hodnoty pro všechny vzorky jsou zapsány v tabulce 22.

**Tabulka 22:** Výsledné rozdíly směrnic sečen (CLIP)

CLIP		
	$\Delta k_x$ [MPa]	$\Delta k_y$ [MPa]
Vzorek 1	0,93	-1,21
Vzorek 2	-	-
Vzorek 3	0,16	-2,30
Vzorek 4	1,51	-1,72
Vzorek 5	0,26	-1,32

Z výsledných hodnot lze vyčíst, že všechny křivky pro vzorky CLIP se v rozsahu do 10 % deformace chovají lineárně. Pokud zanedbáme rozdíl do 3 MPa. Lze tedy potvrdit tvrzení z vizuálního posouzení grafu.

Tvarová tuhost vzorku je potřeba pro konečné vyhodnocení, zda se tištěný vzorek elastomeru chová stejně jako konvenčně vyráběný elastomer. Vypočtené tvarové tuhosti  $k$  jsou zapsány v tabulce 23.

**Tabulka 23:** Výsledné hodnoty tvarových tuhostí  $k$ 

Materiál	Vzorek	Tvarová tuhost $k$ [MPa]	Materiál	Vzorek	Tvarová tuhost $k$ [MPa]
CLIP	C1	13,40	SLA	S1	-
	C2	-		S2	17,87
	C3	14,83		S3	-
	C4	11,83		S4	16,34
	C5	12,83		S5	17,17
$\Phi$		13,22	$\Phi$		17,13



## 9.2 Vyhodnocení zkoušky objemové stlačitelnosti

Celou zkoušku i vyhodnocení provedl ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky na Vysokém učení technickém v Brně. Výsledné hodnoty modulu objemové pružnosti jsou zapsány do tabulky 24.

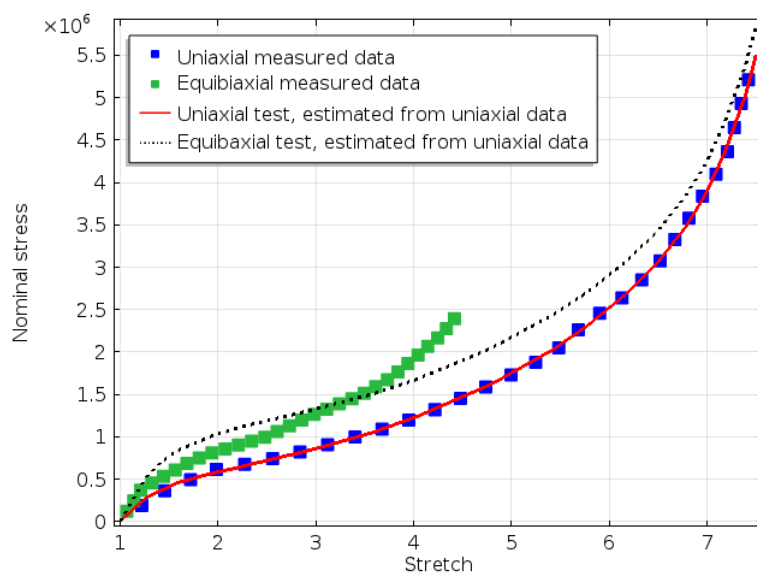
**Tabulka 24:** Výsledné hodnoty objemových modulů K

Materiál	Vzorek	Objemový modul K [MPa]	Materiál	Vzorek	Objemový modul K [MPa]
CLIP	C1	2835	SLA	S1	2843
	C2	2708		S2	2793
	C3	2783		S3	2946
	C4	-		S4	-
	C5	-		S5	-
$\phi$		2775	$\phi$		2861

## 9.3 Rozdíl mezi jednoosou a dvouosou tahovou zkouškou

Nejpodstatnější zkouškou je jednoosá tahová zkouška. Pokud chceme poskytnout spolehlivá data, je zapotřebí mnoho testů, často při různých teplotních a stresových úrovních. Materiálové parametry získané z běžné tahové jednoosé zkoušky při nízkých rychlostech nemusí představovat chování materiálu při vysokých deformačních rychlostech.

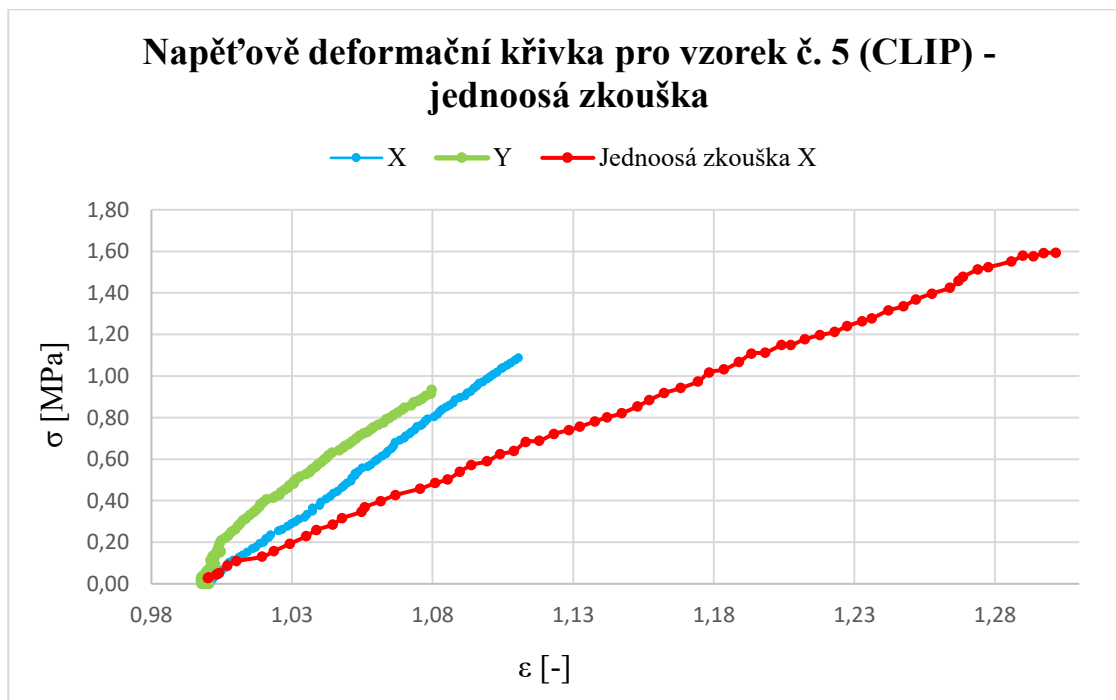
Pokud používáme pouze jednoosou zkoušku, nemůžeme dosáhnout úplné napětíově deformační křivky daného materiálu a nemůžeme říct co se skutečně děje s materiálem, který je cyklicky namáhán. Jednoosá zkouška tahem nám určí závislost napětí na deformaci v testovaném směru, ale nebude obsahovat údaje o deformacích v příčném směru. Bez těchto dat nemáme žádné informace o křížové vazbě mezi směry. Řízením poměrů mezi zatíženími ve dvou kolmých směrech lze získat mnohem více informací než z jednoosé zkoušky. Jak je znázorněno na obrázku 46, chyba křivky je v některých úsecích až 20 %. [42]



**Obrázek 46:** Rozdíl mezi jednoosou a dvouosou tahovou zkouškou [42]

Pro vzorek č. 5 vyrobený technologií CLIP byla provedena jednoosá tahová zkouška. Zkouška byla provedena na dvouosém stroji, je tedy pouze ukázková. Navrhují provést plnohodnotnou jednoosou tahovou zkouškou na trhacím zkušebním stroji.

I díky ukázkové jednoosé tahové zkoušce lze vidět, že nám křivka vykresluje chování materiálu ve vyšších procentech deformace, ale vyskytuje se zde chyba křivky a jsou zanedbané informace o křížové vazbě mezi směry X a Y (viz obrázek 47).



**Obrázek 47:** Názorný rozdíl mezi jednoosou a dvouosou tahovou zkouškou na vzorku č. 5 (CLIP)

## 10 Diskuze k výsledkům práce

Cílem této diplomové práce je začít zkoumat velice zajímavý hyper-elastický materiál vyrobený novou technologií – 3D tiskem. Hyper-elastický materiál je takový materiál, který snese velké přetvoření s malými objemovými změnami. Je to skoro nestlačitelný materiál. Cílem je tedy zjistit, zda se 3D tištěný elastický materiál chová stejně jako konvenčně vyrobený elastomer.

První metodou, kterou se hodnotily vzorky byla vizuální kontrola. Na první pohled šlo vidět, že vzorky SLA byly tužší, povrchovou úpravu měly horší a poslední položená vrstva materiálu byla pod  $45^\circ$ . Vzorky CLIP měly velice dobrou povrchovou úpravu a poslední položená vrstva materiálu byla rovnoběžná s hranou vzorku. Při dvouosé tahové zkoušce se vzorky vyrobené technologií SLA trhaly ve směru X a znehodnotily se tak data pro dva vzorky. Je možné, že se vzorky trhaly kvůli orientaci vrstev při výrobě vzorku. Pro další zkoušky a výzkumy bych navrhovala si předem určit, jak má být vzorek tištěn a v jakém směru mají být pokládány vrstvy. U vzorků CLIP se tento problém neobjevil. U druhého vzorku nevyšly data kvůli vyklouznutí ze svorek. Na první pohled se tedy zdá, že je materiál anizotropní, ale po vyhodnocení zkoušek a grafů napětově deformační křivky se ukázalo, že jsou materiály vyrobené technologií SLA i CLIP izotropní. Model hyper-elastického materiálu je izotropní a nelineární. Izotropie se tedy potvrdila i u 3D tištěných materiálů, dále nás tedy zajímá linearita napětově deformační křivky.

Díky cyklické tahové dvouosé zkoušce jsme získali napětově deformační křivky pro každý vzorek. Pro vyhodnocení dvouosé zkoušky je dobré si uvědomit, že polymerní látky se deformují lineárně elasticky pouze v oblasti malých deformací a velmi pomalých deformací. Hranice mezi lineárním a nelineárním průběhem deformace, která se nazývá mez linearity, závisí na velikosti deformace, její rychlosti a průběhu. Z vytvořených grafů pro každý vzorek je zřejmé, že můžeme napětově deformační křivku považovat za lineární v rozmezí do 10 % deformace. Pokud zanedbáme rozdíl směrnic vytvořených sečen do 5 MPa. Toto vyhodnocení platí pro vzorky vyrobené technologií SLA i technologií CLIP. Kompozitní materiály vykazují velké elastické přetvoření. Chování elastomerů je silně nelineární. Jelikož jsou u hyper-elastických materiálů složitější modely, než lineární Hookeův zákon doporučuji dále zkoumat tento zajímavý materiál a provést více materiálových zkoušek než pouze biaxiální zkoušku a zkoušku objemové stlačitelnosti a v rozsahu vyšším, než je 10 % deformace.

Další možné zkoušky:

- Zkouška jednoosým tahem
- Zkouška jednoosým tlakem
- Zkouška krutem
- Zkouška smykem

Další informací, kterou jsme z tahové dvouosé zkoušky vypožorovali je změkčení materiálů, tedy Mullinsův efekt. Mullinsův efekt je zvláštním aspektem mechanické odezvy v elastomerech a jestliže natahujeme elastomer podruhé podobným namáháním jako poprvé, je nutná menší síla. Dle tabulek 19 a 21 můžeme pozorovat, že materiál nepatrně změkčuje a vytištěné elastomery tedy mají typickou vlastnost hyper-elastických materiálů.

Pro elastomery je velmi důležitá míra jejich objemové stlačitelnosti. Mají velmi malou stlačitelnost a lze je tedy pokládat za objemově nestlačitelné materiály. Pokud je jeho objemový modul pružnosti o několik řádů vyšší než tvarová tuhost při zatížení, můžeme tvrdit, že je materiál objemově nestlačitelný. To je další informace, kterou se podařilo zjistit díky zkouškám provedených v závěrečné práci. Tvarová tuhost materiálu se zjistila z grafů napětově deformačních křivek, kde se pohybovala kolem 12-14 MPa u vzorků vyrobených technologií CLIP a u vzorků SLA byla tvarová tuhost 16-18 MPa. Díky zkoušce objemové stlačitelnosti jsme získali objemový modul  $K$ . Pro vzorky CLIP vyšel objemový modul 2800 MPa a pro vzorky SLA 2900 MPa. Jelikož je objemový modul o několik řádů vyšší než tvarová tuhost materiálu, můžeme tvrdit, že oba materiály jsou objemově nestlačitelné a mají tedy stejné vlastnosti jako elastomer vyrobený konvenční metodou.

## 11 Závěr

3D tisk představuje stále se rozšiřující obor, hlavně kvůli jeho možnostem uplatnění, širokým výběrem technologií a materiálů. Z tohoto důvodu je snaha o výzkum v tomto oboru velice důležitá. Ať už se jedná o uplatnění 3D tisku do strojírenství, letectví či do lékařství, má tato technologie velkou budoucnost. Cílem této diplomové práce, bylo získat základní přehled o technologiích, které dokáží tisknout elastické materiály, o materiálech samotných a zjistit více informací o jejich vlastnostech a chování při cyklickém namáhání. Tyto poznatky mohou vést k dalšímu zkoumání těchto materiálů a v budoucnu nám tyto materiály a technologie mohou usnadnit život.

Praktická část se zabývala výzkumem elastomerů vytištěných technologií SLA a technologií CLIP. Vzorky byly cyklicky namáhány tahovou dvouosou zkouškou do 10 % deformace, při které se došlo k závěru, že v tomto rozsahu se vzorky chovají lineárně a jsou izotropní. Při této zkoušce nastalo pár problémů v podobě trhání vzorků SLA ve směru X. Proto byl snížen rozsah deformace a počet cyklů. Díky druhé zkoušce objemové stlačitelnosti se dalo určit, zda je materiál objemově nestlačitelný, tak jak se od elastomerů očekává. Výsledný objemový modul vyšel několikanásobně vyšší než tvarová tuhost, kterou jsme získali z dvouosé tahové zkoušky. Závěr je tedy takový, že oba materiály jsou objemově nestlačitelné a chovají se podobně jako elastomer vyrobený konvenční metodou.

Při zpracování diplomové práce mě velice zaujala problematika elastických materiálů. Problematika těchto materiálů je natolik složitá, že jí v rámci jedné diplomové práce nelze vyřešit pro celou oblast 3D tištěných materiálů. Výzkum těchto materiálů je ale velmi zajímavý a doporučuji se nadále touto oblastí zabývat.

## Použitá literatura

- [1] RAJESH R, SUDHEER S a MITHUN V KULKARNI. *SELECTIVE LASER SINTERING PROCESS –A REVIEW* [online]. 2015, 10 [cit. 2017-10-15]. ISSN 2393-8374. Dostupné z: <http://troindia.in/journal/ijcesr/vol2iss10/91-100.pdf>
- [2] *What is Additive Manufacturing?* [online]. [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.com/basics/>
- [3] NEWMAN, John. *Additive Manufacturing: Past, Present and Future* [online]. 2016 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <https://www.cmtc.com/blog/additive-manufacturing-past-present-and-future>
- [4] TOLLE, Sarah. EARLY ACCESS TO PRE-RELEASE DEVICE ACCELERATES INNOVATION IN MATERIALS AND PRODUCT DESIGN. *Carbon3D* [online]. 2015 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/news/ford-taps-carbon3d-s-clip-technology/>
- [5] WHEELER, Andrew. New 3D Printer Grows Parts from Liquid. It's like the T-1000 in Terminator. *Engeneering.com* [online]. 2015 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/9808/New-3D-Printer-Grows-Parts-from-Liquid-Its-like-the-T-1000-in-Terminator.aspx>
- [6] ARTHUR CASSAIGNAU. *Carbon 3D Printer: Introducing the CLIP Technology in 3D Printing* [online]. 2016 [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/03/01/introducing-the-carbon-3d-printer-and-clip-technology>
- [7] EOLE RECROSIO. *FDM vs. SLA vs. SLS: Battle of the 3D technologies* [online]. [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/05/15/fdm-vs-sla-vs-sls-vs-clip-battle-of-the-3d-technologies/>
- [8] LINDSTROM, Ashley. *Selective Laser Sintering, Birth of an Industry* [online]. 2012 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>
- [9] *Princip SLS technologie* [online]. [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/33/Selective\\_laser\\_melting\\_system\\_schematic.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/33/Selective_laser_melting_system_schematic.jpg)

- [10] *5 things to know about our 3D printers* [online]. 2016 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://www8.hp.com/us/en/hp-news/press-release.html?id=2266135#.WiaQWvnibIU>
- [11] *HP MULTIJET FUSION* [online]. [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://www.3dees.cz/hp-jetfusion-3d#196>
- [12] *HP Reveals More Info About Their Multi Jet Fusion 3D Printing Technology, Plans for Second 3D Printer* [online]. [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <https://3dprint.com/113630/hp-multi-jet-fusion-plans-info/>
- [13] JOIRE, Myriam. *Texas Instruments brings sci-fi tech to life with DLP* [online]. 2013 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <https://www.engadget.com/2013/02/11/texas-instruments-brings-sci-fi-tech-to-life-with-dlp-hands-on/>
- [14] *Digital Light Processing (DLP)* [online]. 2016 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3d-printing-technology-overview/>
- [15] PALERMO, Elizabeth. *What is Stereolithography?* [online]. 2013 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>
- [16] *Stereolithography* [online]. 2013 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [17] *3DAddFab – Powered by Objet Polyjet Technology* [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.3daddfab.com/technology/>
- [18] *PolyJet* [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaciu-pravy/polyjet>
- [19] PolyJet Technology. *Stratasys* [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/polyjet-technology>
- [20] TIRILÄ, Hanna-Mari, Minna POIKELISPÄÄ a Kalle HANHI. *Elastomeric materials* [online]. 2007 [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: [http://laroverket.com/wp-content/uploads/2015/03/Elastomeric\\_materials.pdf](http://laroverket.com/wp-content/uploads/2015/03/Elastomeric_materials.pdf). TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [21] SHANKS, Robert A. a Ing KONG. General Purpose Elastomers: Structure, Chemistry, Physics and Performance. *Advances in Elastomers I*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, 2013-3-30, 11-45. Advanced Structured Materials. DOI: 10.1007/978-3-642-20925-3\_2. ISBN 978-3-642-20924-6.
- [22] ACEO Technology [online]. [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <https://www.aceo3d.com/>

- [23] WALKER, James. *Elastomer Engineering Guide* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: [https://www.jameswalker.biz/de/pdf\\_docs/148-elastomer-engineering-guide](https://www.jameswalker.biz/de/pdf_docs/148-elastomer-engineering-guide)
- [24] *Materiálový list – DuraForm Flex* [online]. [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: [https://www.prototech.com/wp-content/uploads/2012/06/DS\\_DuraForm\\_Flex\\_Plastic.pdf](https://www.prototech.com/wp-content/uploads/2012/06/DS_DuraForm_Flex_Plastic.pdf)
- [25] *Materiálový list – DuraForm TPU Elastomer* [online]. [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: [https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2017-02/3D-Systems\\_DuraForm\\_TPU\\_Elastomer\\_SLS\\_Datasheet\\_09.23.16\\_USEN\\_WEB.pdf](https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2017-02/3D-Systems_DuraForm_TPU_Elastomer_SLS_Datasheet_09.23.16_USEN_WEB.pdf)
- [26] SIL: Silicone. *www.carbon3d.com* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/materials/silicone/>
- [27] EPU: Elastomeric Polyurethane. *www.carbon3d.com* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/materials/epe-elastomeric-polyurethane/>
- [28] Materiál VisiJet CE-BK. *www.3dsystems.com* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/materials/visijet-ce-bk-elastomeric-black>
- [29] Materiál VisiJet CE-NT. *www.3dsystems.com* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/materials/visijet-ce-nt-elastomeric-natural>
- [30] Materiál VisiJet M2 ENT. *Www.3dsystems.com* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/materials/visijet-m2-ent-elastomeric-black>
- [31] Materiál VisiJet M2 EBK. *Www.3dsystems.com* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/materials/visijet-m2-ebk-elastomeric-black>
- [32] *Materiál E-Shore A* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://enviontec.com/3d-printing-materials/perfactory-materials/e-shore-a/>
- [33] *Materiál E-Shell 500 Series* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://enviontec.com/3d-printing-materials/perfactory-materials/e-shell-500-series/>
- [34] *Materiál Flexible Resin 1 L* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://formlabs.com/materials/engineering/#flexible-overview>
- [35] *Materiál Agilus* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/polyjet-materials#datasheet>
- [36] *Invent Medical* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://www.inventmedical.com/>
- [37] *Formlabs Form 2* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>



[38] *Formlabs Form 2* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/sla-dlp/formlabs-form-2/#1510327824869-2aa6140a-ea25>

[39] GOSCH, Anja. *Characterization of the tension performance in monotonic and cyclic mode for various elastomers*. Leoben, 2016. Bachelor Thesis. Montan universitaet Leoben. Vedoucí práce -Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald Pinter.

[40] *Pore Volume Compressibility* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.corelab.com/ps/pore-volume-compressibility>

[41] BURŠA, Jiří. Výpočtové modelování problémů mechaniky živých a neživých těles z kompozitních materiálů umožňujících velké deformace: Computational modelling in mechanics of living and non-living bodies of composite materials showing large deformations: zkrácená verze habilitační práce. Brno: VUTIU, 2006. ISBN 80-214-3105-9.

[42] SÖNNERLIND, Henrik. Obtaining Material Data for Structural Mechanics from Measurements[online]. 2015 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/obtaining-material-data-for-structural-mechanics-from-measurements/>

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1:</b> Princip technologie SLS [9] .....	12
<b>Obrázek 2:</b> Princip technologie Carbon CLIP [6] .....	13
<b>Obrázek 3:</b> Proces technologie MJP [33] .....	14
<b>Obrázek 4:</b> Proces technologie HP Multi Jet Fusion [12] .....	15
<b>Obrázek 5:</b> Proces technologie DLP [14] .....	16
<b>Obrázek 6:</b> Proces technologie SLA [16] .....	17
<b>Obrázek 7:</b> Proces technologie ACEO [22] .....	18
<b>Obrázek 8:</b> Proces technologie PolyJet [17] .....	19
<b>Obrázek 9:</b> Graf cyklického zatížení elastomeru (Mullinsův efekt) [39] .....	22
<b>Obrázek 10:</b> Materiál DuraForm Flex [24] .....	25
<b>Obrázek 11:</b> Materiál DuraForm TPU Elastomer [25] .....	26
<b>Obrázek 12:</b> Výrobky z materiálu Silikon [26] .....	26
<b>Obrázek 13:</b> Materiál EPU: Elastomerní polyuretan [27] .....	27
<b>Obrázek 14:</b> Materiál VisiJet CE-BK [28] .....	28
<b>Obrázek 15:</b> Materiál VisiJet CE-NT [29] .....	29
<b>Obrázek 16:</b> Materiál VisiJet M2 ENT [30] .....	29
<b>Obrázek 17:</b> Materiál VisiJet M2 EBK [31] .....	30
<b>Obrázek 18:</b> Materiál E-Shore A [32] .....	31
<b>Obrázek 19:</b> Materiál E-Shell 500 Series [33] .....	32
<b>Obrázek 20:</b> Materiál Flexible Resin 1 L [34] .....	33
<b>Obrázek 21:</b> Materiál ACEO Silicone [22] .....	33
<b>Obrázek 22:</b> Materiál Agilus Black [35] .....	34
<b>Obrázek 23:</b> Kompozitní materiály PolyJet [35] .....	35
<b>Obrázek 24:</b> Souhrnné tabulkové srovnání materiálů – pevnost v tahu .....	36
<b>Obrázek 25:</b> Souhrnné tabulkové srovnání materiálů – tvrdost .....	37

<b>Obrázek 26:</b> Výrobky firmy Invent Medical Group s.r.o. [36] .....	38
<b>Obrázek 27:</b> Model vzorku pro dvouosou zkoušku .....	39
<b>Obrázek 28:</b> Model vzorku pro zkoušku objemové stlačitelnosti .....	39
<b>Obrázek 29:</b> Vytisknuté vzorky pro dvouosou zkoušku .....	40
<b>Obrázek 30:</b> Tiskárna Formlabs Form 2 [37] .....	41
<b>Obrázek 31:</b> Tiskárna Carbon M2 [4].....	42
<b>Obrázek 32:</b> Zařízení pro dvouosou zkoušku .....	43
<b>Obrázek 33:</b> Zakreslené markery na vzorku .....	45
<b>Obrázek 34:</b> Uchycený vzorek v zařízení.....	45
<b>Obrázek 35:</b> Nastavení parametrů v programu BASLER.....	46
<b>Obrázek 36:</b> Série nasnímaných obrázků zkoušeného vzorku .....	46
<b>Obrázek 37:</b> Textový soubor s vypočtenými hodnotami programem Tibixus .....	47
<b>Obrázek 38:</b> Princip zkoušky objemové stlačitelnosti [40] .....	48
<b>Obrázek 39:</b> Graf napětově deformační křivky pro vzorek č. 5 (SLA) .....	50
<b>Obrázek 40:</b> Schéma pro výpočet tvarové tuhosti vzorku pomocí sečny .....	50
<b>Obrázek 41:</b> Hodnoty pro výpočet z grafu napětově deformační křivky pro vzorek č.5 (SLA) pro směr X (vlevo – na začátku křivky, vpravo – na konci křivky).....	51
<b>Obrázek 42:</b> Hodnoty pro výpočet z grafu napětově deformační křivky pro vzorek č.5 (SLA) pro směr Y (vlevo – na začátku křivky, vpravo – na konci křivky).....	51
<b>Obrázek 43:</b> Graf napětově deformační křivky pro vzorek č. 5 (CLIP) .....	53
<b>Obrázek 44:</b> Hodnoty pro výpočet z grafu napětově deformační křivky pro vzorek č.5 (CLIP) pro směr X.....	54
<b>Obrázek 45:</b> Hodnoty pro výpočet z grafu napětově deformační křivky pro vzorek č.5 (CLIP) pro směr Y .....	54
<b>Obrázek 46:</b> Rozdíl mezi jednoosou a dvouosou tahovou zkouškou [42].....	58
<b>Obrázek 47:</b> Názorný rozdíl mezi jednoosou a dvouosou tahovou zkouškou na vzorku č. 5 (CLIP).....	58

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1:</b> Vlastnosti materiálu DuraForm Flex [24] .....	25
<b>Tabulka 2:</b> Vlastnosti materiálu DuraForm TPU Elastomer [25].....	26
<b>Tabulka 3:</b> Vlastnosti materiálu Silikon [26].....	27
<b>Tabulka 4:</b> Vlastnosti materiálu EPU: Elastomerní polyuretan [27] .....	27
<b>Tabulka 5:</b> Vlastnosti materiálu VisiJet CE-BK [28] .....	28
<b>Tabulka 6:</b> Vlastnosti materiálu VisiJet CE-NT [29] .....	29
<b>Tabulka 7:</b> Vlastnosti materiálu VisiJet M2 ENT [30].....	30
<b>Tabulka 8:</b> Vlastnosti materiálu VisiJet M2 EBK [31] .....	30
<b>Tabulka 9:</b> Vlastnosti materiálu E-Shore A [32] .....	31
<b>Tabulka 10:</b> Vlastnosti materiálu E-Shell 500 Series [33] .....	32
<b>Tabulka 11:</b> Vlastnosti materiálu Flexible Resin 1 L [34] .....	33
<b>Tabulka 12:</b> Vlastnosti materiálu ACEO Silicone, Shore A 60 [22].....	34
<b>Tabulka 13:</b> Vlastnosti materiálu ACEO Silicone, Shore 30 [22].....	34
<b>Tabulka 14:</b> Vlastnosti materiálu Agilus Black [35] .....	35
<b>Tabulka 15:</b> Vlastnosti kompozitních materiálů [35] .....	35
<b>Tabulka 16:</b> Vlastnosti a parametry tiskárny Form 2 [37].....	40
<b>Tabulka 17:</b> Vlastnosti a parametry tiskárny Carbon M2 [4].....	42
<b>Tabulka 18:</b> Naměřené rozměry vzorků .....	44
<b>Tabulka 19:</b> Výsledky směrnic deformačně napěťové křivky pro vzorky SLA.....	52
<b>Tabulka 20:</b> Výsledné rozdíly směrnic sečen (SLA).....	53
<b>Tabulka 21:</b> Výsledky směrnic deformačně napěťové křivky pro vzorky CLIP.....	55
<b>Tabulka 22:</b> Výsledné rozdíly směrnic sečen (CLIP).....	56
<b>Tabulka 23:</b> Výsledné hodnoty tvarových tuhostí k .....	56
<b>Tabulka 24:</b> Výsledné hodnoty objemových modulů K .....	57